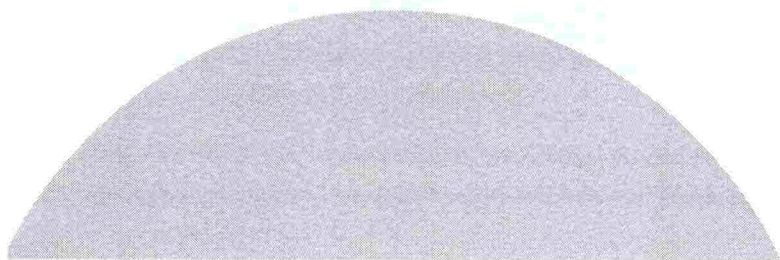
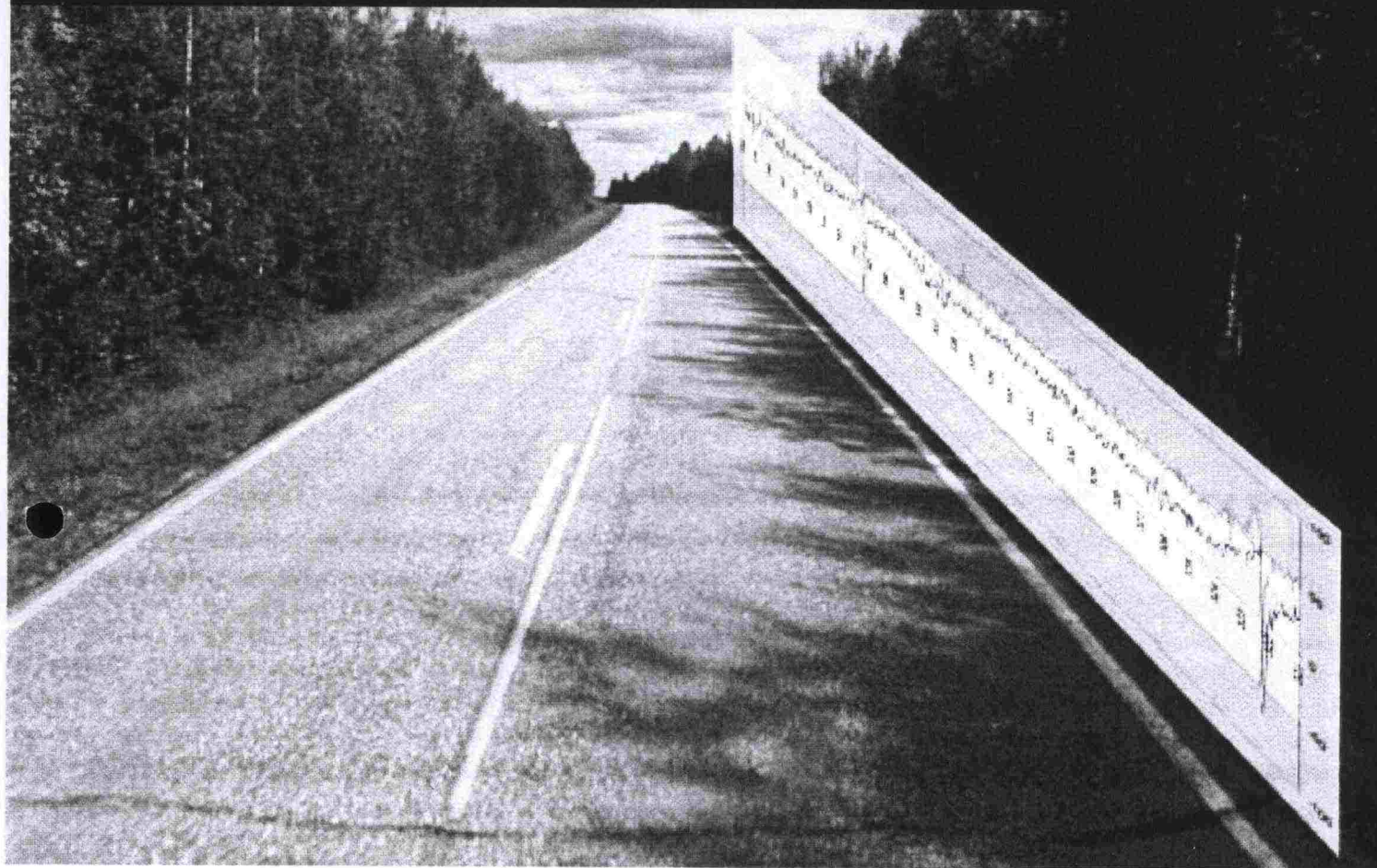




Kalervo Mattila, Seppo Järvinen

## Poikkihalkeamien epätasaisuus

Tiehallinnon selvityksiä 44/2006



Kalervo Mattila, Seppo Järvinen

# **Poikkihalkeamien epätasaisuus**

**Tiehallinnon selvityksiä 44/2006**

*Kannen kuva: Mari Nurminen, Kalervo Mattila*

Verkkojulkaisu pdf ([www.tiehallinto.fi/julkaisut](http://www.tiehallinto.fi/julkaisut))

ISSN 1459-1553

ISBN 978-951-803-783-8

TIEH 3201020-v

**Tiehallinto**

Asiantuntijapalvelut

Opastinsilta 12 A

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelinvaihte 0204 22 11



**Kalervo Mattila, Seppo Järvinen: Poikkihalkeamien epätasaisuus.** Helsinki 2006. Tiehallinto, Asiantuntijapalvelut. Tiehallinnon selvityksiä 44/2006. 43 s. + liitt. 11 s. ISSN 1457-9871, ISBN 978-951-803-782-1, TIEH 3201020.

**Asiasanat:** asfalttipäällysteet, mittaukset, liikenneturvallisuus, halkeilu, raskaat ajoneuvot  
**Aiheluokka:** 33, ~~82~~ 12

## TIIVISTELMÄ

Epätasaiset, toistuvat poikkihalkeamat ovat raskaan liikenteen ajomukavuutta ja turvallisuutta heikentävä tekijä lähinnä Pohjois-Suomessa, mutta myös Etelä-Suomessa esiintyy tällaisia tienkohtia. Tällaiset epätasaisuudet aiheuttavat vaaratilanteita kuljettajan hakiessa ajolinjaa poikkihalkeamien aiheuttamien terävien iskujen pehmentämiseksi, mikä edelleen aiheuttaa ajoneuvon huojuntaa.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää menetelmä, jolla epätasaiset poikkihalkeamat voidaan paikallistaa tieverkolta, muuntamalla PTM-mittauksista saatavan profiilidatan keräämistä ja mahdollisuuksien mukaan verrata profiilidattaa automaattisen päällysteiden vauriomittauksen (APVM) vauriokarttoihin.

Keväällä 2006 toteutettiin Lapissa neljälle tieosalle ajopaneeli, jonka 10 m ja 300 m havaintoja ja kokemuksia verrattiin PTM-mittauksen avulla tuotettuihin tunnuslukuihin. Samojen tieosien PTM-mittaus tehtiin huhti-toukokuussa 2006 ja APVM-mittaus kesäkuun lopulla 2006. APVM:n vauriokartoista saatiin selkeät poikkihalkeamakohdat kultakin tieosalta. Lisäksi tuotettiin oheisaineistona Hämeen betoniteiden mittaustulokset.

Poikkihalkeaminen reunojen tasoeron tutkimisessa käytettyjä tunnuslukuja olivat Faulting-algoritilla ja Tasoeroalgoritilla tuotetut tunnusluvut sekä MPD (Mean Profile Depth) ja IRI 50 mm. Näistä tunnusluvuista Faulting ja MPD saadaan PTM:n alemman tason datan avulla ja Tasoeroalgoritmin data ja IRI 50 mm erikoismittauksena tuotetun pituusprofiilin avulla.

Tunnuslukujen soveltuvuutta arvioitiin tilastollisten seikkojen (ajopaneelin 10 m ja 300 m vastaavuudet) sekä lähtötietona käytettävän mittausdatan ja laskentatulosten käytettävyyden perusteella. Lähtötiedoksi mitatun datan käytettävyyden kannalta ovat Faulting ja MPD parhaita, koska tunnusluvuissa käytettävä data saadaan periaatteessa miltä tahansa mitatulta tieltä (tieto tallennustarpeesta vaaditaan ennen mittausta). Laskentatulosten käytettävyys on hyvä Faulting-tunnusluvulla. Ajopaneelin 10 m havaintoihin verrattuna vastaavuusprosentti on paras Tasoeroalgoritilla, mutta kaikilla muilla tunnusluvuilla myös hyvä. Tasoeroalgoritmin huonona puolena ovat toisaalta liialliset havaintomäärät. Vertailussa ajopaneelin 300 metrin havaintoihin ovat parhaita Faulting ja MPD.

Kokonaisuuden huomioiden suositellaan asfalttipäällysteisten teiden epätasaisen poikkihalkeamien havainnointiin Faulting-tunnuslukua ja vaihtoehtona MPD:tä.

Betoniteiden osalta Faulting vaikuttaa soveltuvalta, minkä lisäksi APVM:n vauriokartat antavat erittäin hyvän havaintomateriaalin betonilaattojen saumakohtien avonaisuuden selvittämiseen.



**Kalervo Mattila, Seppo Järvinen: Ojämnhet i tvärsprickor.** Helsingfors 2006. Vägförvaltningen. Vägförvaltningens utredningar 44/2006. 43 s. + bilagor 11 s. ISSN 1457-9871, ISBN 978-951-803-782-1, TIEH 3201020.

**Nyckelord:** asfaltbeläggningar, mätningar, trafiksäkerhet, sprickor, tunga fordon

## SAMMANFATTNING

Ojäмна och återkommande tvärsprickor försämrar körkomforten och säkerheten för den tunga trafiken särskilt i norra Finland men också i delar av södra Finland. Farliga situationer uppstår när förare söker jämna körspår för att undvika skarpa stötar till följd av tvärsprickorna, vilket leder till att fordonet börjar svänga.

Målsättningen med den här utredningen var att hitta en metod med vilken ojämna tvärsprickor kan lokaliseras på vägnätet. Det här görs genom att omvandla insamlade profildata som fås från mätningar av vägytan (PTM), och i mån av möjlighet jämföra profildata med kartorna över skador som erhållits genom automatisk mätning av skador i beläggningen (APVM).

På våren 2006 genomfördes testkörning på fyra vägavsnitt i Lappland, där 10 m och 300 m observationer och erfarenheter jämfördes med nyckeltal från PTM-mätningar. PTM-mätningar genomfördes på samma vägavsnitt i april - maj 2006 och APVM-mätningar i slutet av juni 2006. Utifrån kartorna över skadorna fick man veta tydligt var tvärsprickor finns på olika vägavsnitt. Dessutom producerades mättningsresultat av betongvägar i Tavastland.

I undersökningen av nivåskillnaden mellan tvärsprickors kanter användes som nyckeltal sådana nyckeltal som producerats med Faulting algoritm och algoritmen som beräknar nivåskillnaden mellan tvärsprickors kanter samt MPD (Mean Profile Depth) och IRI 50 mm. Faulting och MPD fås med hjälp av data från lägre nivåer vid PTM-mätningar. Data från algoritmen som beräknar nivåskillnaden och IRI 50 mm fås med hjälp av längdprofilen på basis av en specialmätning.

Nyckeltalens lämplighet utvärderades utifrån statistiska faktorer (motsvarigheter för testkörningens 10 meter och 300 meter) samt hur användbara de mättningsdata som används som utgångsinformation och räkningsresultatet är. Med tanke på användbarheten av de data som mäts som utgångsinformation är Faulting och MPD de bästa, eftersom data som används i nyckeltalen fås i princip från vilken mätt väg som helst (före mätningen måste man veta om informationen ska sparas). Räkningsresultatets användbarhet är bra med Faulting nyckeltal. Jämfört med testkörningens 10 m observationer har algoritmen som beräknar nivåskillnaden den bästa motsvarighetsprocenten, men alla andra nyckeltal har också bra motsvarighetsprocent. En nackdel, som algoritmen som beräknar nivåskillnaden har, är för stora observationsmängder. När man jämförde testkörningens 300 m observationer visade det sig att Faulting och MPD var de bästa.

Med beaktande av helheten rekommenderas det att man använder Faulting nyckeltal i observationer av ojämna tvärsprickor i asfalterade vägar. Som ett alternativ kan också MPD användas.

För betongvägars del verkar Faulting vara lämplig, men också kartorna över skador som erhållits med APVM-mätningar ger bra observationsmaterial för att ta reda på öppenheten i fogarna mellan betongplattorna.

Kalervo Mattila, Seppo Järvinen: Unevenness of transverse cracks. Helsinki 2006.  
Finnish Road Administration. Finnra Reports 44/2006. 43 p. + app. 11 p. ISSN 1457-9871,  
ISBN 978-951-803-782-1, TIEH 3201020.

**Keywords:** asphalt pavements, measurements, traffic safety, cracking

## SUMMARY

Uneven and continuous transverse cracks hamper and endanger heavy traffic especially in Northern Finland but also in some places in Southern Finland. Dangerous situations happen when a driver is looking for a driving path to avoid sharp edges caused by transverse cracks and resulting in vehicle swaying.

The aim of this study was to find a method with which uneven transverse cracks can be located on the road network. This can be achieved by varying the collecting of profile data which is acquired from road condition measurements and if possible, compare profile data to crack maps of automated crack measurements of pavements.

In the spring 2006, a test drive was implemented on the four road sections in Lapland. 10 m and 300 m observations and experiences were compared to parameters produced by road condition measurements. Road condition measurements of the same road sections were performed in April and May 2006 and automated crack measurements of pavements at the end of June 2006. Exact locations of the transverse cracks in each road section were acquired from the crack maps of automated crack measurements. In addition, measurements of concrete roads were acquired in the province of Häme.

Parameters were used in studying the level difference of transverse crack edges. These were parameters produced by Faulting algorithm and algorithm used in calculating the level difference of crack edges (or concrete plates) as well as MPD (Mean Profile Depth) and IRI 50 mm. Faulting and MPD parameters are produced using the low level data of road condition measurements. Data of algorithm used in calculating the level difference of crack edges and IRI 50 mm is acquired with the help of length profile produced as a special measurement.

Suitability of parameters was evaluated on grounds of statistical matters (10 meter and 300 meter equivalence of the test drive) and also usability of measurement data used as initial data and calculation results. Based on the usability of data measured for initial data, Faulting and MPD turned out to be the best choices because data used in these parameters is produced from any road measured (before starting the measuring, need of saving has to be known). The usability of calculation results is good when Faulting parameter is used. As compared to 10 m observations in the test drive, algorithm used in calculating the level difference of crack edges has the best equivalence percentage. However, all the other parameters also have a good equivalence percentage. As a disadvantage concerning algorithm used in calculating the level difference of crack edges, there is an excessive number of observations. Faulting and MPD are best in comparison of 300 m observations of the test drive.

As a conclusion, it is recommended to use Faulting parameter in observing uneven transverse cracks of asphalted roads. MPD can be used as an alternative. Concerning concrete roads, Faulting seems to be suitable. In addition, crack maps are good aid in studying the openness of joint between concrete slabs.



## ESIPUHE

Toistuvat poikkihalkeamat ja niiden aiheuttamat epätasaisuudet ovat ras-  
kaan liikenteen lisäksi myös henkilöautoliikenteen ajomukavuutta ja turvalli-  
suutta heikentävä tekijä.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin poikkihalkeamaepätasaisuuksien vaikutuk-  
sia ajopaneelin avulla. Lisäksi selvitettiin mahdollisuuksia poikkihalkeama-  
epätasaisuuksien tunnistamiseen PTM- ja APVM-mittaustuloksista ja verrat-  
tiin mittaustuloksia paneelista saatuihin kokemuksiin.

Työtä ovat ohjanneet Tiehallinnon taholta Kari Lehtonen ja Sami Petäjä asi-  
antuntijapalveluista. Tehtävän konsulttina toimi Ramboll Finland Oy, jossa  
työstä vastasi DI Kalervo Mattila. Työhön osallistuivat Ramboll Finland  
Oy:stä myös FM Seppo Järvinen sekä tasoeroalgoritmiohjelman osalta DI  
Vesa Laine. Toukokuussa 2006 pidettyyn ajopaneeliin osallistui Petäjän,  
Mattilan ja Järvisen lisäksi Kalevi Luiro Tiehallinnosta.

Helsingissä marraskuu 2006

Tiehallinto  
Asiantuntijapalvelut



**Sisältö**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>YLEISTÄ</b>                                      | <b>11</b> |
| 1.1      | Poikkihalkeamien haitallisuus                       | 11        |
| 1.2      | Tutkimuksen tavoitteet                              | 11        |
| 1.3      | Aiemmat tutkimukset                                 | 12        |
| 1.4      | Ajopaneeli  | 13        |
| 1.5      | PTM-mittaus   | 15        |
| 1.6      | APVM-mittaus  | 16        |
| <b>2</b> | <b>AJOPANEELIN JA MITTAUSTEN TULOKSET</b>           | <b>18</b> |
| 2.1      | Ajopaneelin tulokset                                | 18        |
| 2.2      | Mittausdatan kohdistaminen                          | 20        |
| 2.3      | PTM-mittausdata                                     | 21        |
| 2.4      | APVM-mittausdata                                    | 25        |
| 2.5      | Laskenta-algoritmien avulla saadut datat            | 27        |
| <b>3</b> | <b>TUNNUSLUKUJEN VERTAILU AJOPANEELIIN</b>          | <b>31</b> |
| 3.1      | Lapin koekohteet                                    | 31        |
| 3.2      | Hämeen betonitiekkohteet                            | 35        |
| 3.3      | Tunnuslukujen vertailu toisiinsa                    | 36        |
| <b>4</b> | <b>JOHTOPÄÄTÖKSET TUNNUSLUKUJEN SOVELTUVUUDESTA</b> | <b>39</b> |
| <b>5</b> | <b>YHTEENVETO</b>                                   | <b>41</b> |
| <b>6</b> | <b>LÄHTEET</b>                                      | <b>42</b> |
| <b>7</b> | <b>LIITTEET</b>                                     | <b>43</b> |

Liite 1 Faulting-laskentaohjelman käyttöohje



## 1 YLEISTÄ

### 1.1 Poikkihalkeamien haitallisuus

Epätasaiset, toistuvat poikkihalkeamat ovat raskaan liikenteen ajomukavuutta ja turvallisuutta heikentävä tekijä lähinnä Pohjois-Suomessa, mutta myös Etelä-Suomessa kyseisiä tienkohtia esiintyy. Tällaiset epätasaisuudet aiheuttavat vaaratilanteita kuljettajan hakiessa ajolinjaa poikkihalkeamien aiheuttamien terävien iskujen pehmentämiseksi, mikä edelleen aiheuttaa ajoneuvon huojuntaa. Täysperävaunullinen kuorma-auto on herkempi poikkihalkeamaepätasaisuuksien vaikutuksille kuin perävaunuton kuorma-auto. Linja-autoon poikkihalkeamaepätasaisuudet vaikuttavat vähemmän kuin täysperävaunulliseen kuorma-autoon, mutta enemmän kuin kuorma-autoon ilman perävaunua. [JP Transplan Oy, 2006]

Epätasaisen poikkihalkeamien syntyyn vaikuttavat voimakkaasti sääolot. Arvioiden mukaan epätasainen poikkihalkeama syntyisi keskellä talvea olevan lämpimän jakson seurauksena. Myös tierakenteen ominaisuudet vaikuttavat rakenteen lämpöominaisuuksiin (karkeassa rakenteessa vuotuiset lämpötilavaihtelut ovat suurempia). Lämpötilan lasku aiheuttaa pakkaskatkon muodostumisen päällysteeseen ja mahdollinen on myös heijastushalkeama, joka syntyy vanhan päällysteen poikkihalkeaman kohdalle uuteen päällysteeseen. Edellä mainittujen syiden lisäksi raskaan liikenteen määrä vaikuttaa poikkihalkeaman syntyyn. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat mm. päällysteen ikä ja routiminen.

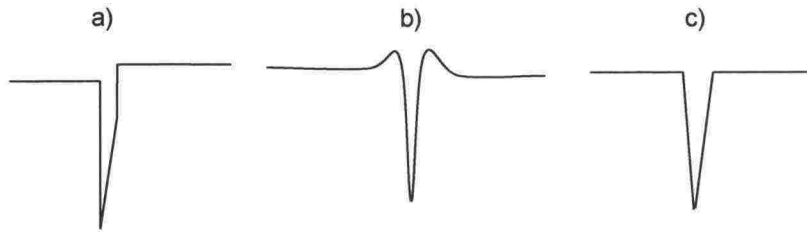
### 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää menetelmä, jolla epätasaiset poikkihalkeamat voidaan paikallistaa tieverkolta, muuntamalla palvelutasomittauksista (PTM) saatavan profiilidatan keräämistä ja mahdollisuuksien mukaan verrata profiilidataa automaattisen päällysteiden vauriomittauksen (APVM) vauriokarttoihin. Lisäksi tavoitteena oli suorittaa keväällä 2006 muutamille tieosille ajopaneeli, jonka havaintoja ja kokemuksia verrataan mittausdataan.

PTM-mittauksissa tuotettava 10 m data on epätasaisen poikkihalkeamien paikantamiseen liian pitkällä tulostusvälillä tuotettua ja 2005 tehdyn tutkimuksen mukaan myöskään 100 mm profiilidata ei anna selkeää ratkaisua.

Kuvassa 1 esitetään epätasaisen poikkihalkeamien tapaukset, jotka ovat relevantteja ja tapaus, joka ei ole relevantti. Epätasaisen poikkihalkeamien muoto vaihtelee jonkin verran, mutta oleellista on halkeaman reunojen taasoero, mistä syntyy ajomukavuutta haittaava tekijä.

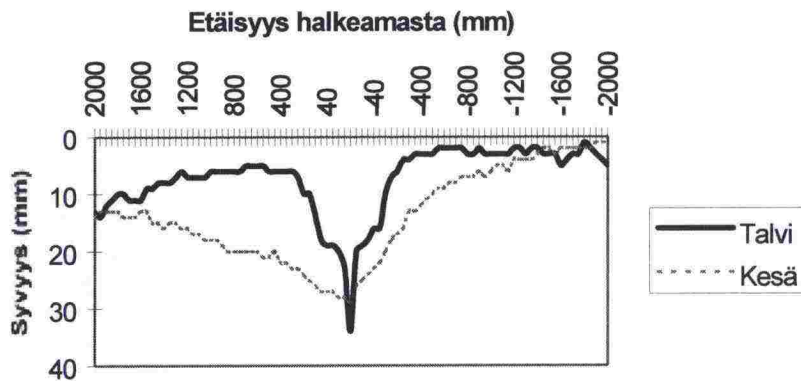




Kuva 1. Kolme erilaista poikkihalkeamatapausta, joista a) ja b) ovat tutkimuksen kannalta oleellisia. Reunoiltaan tasaiset poikkihalkeamat eivät kuulu haitallisiin poikkihalkeamiin, paitsi siinä tapauksessa, että poikkihalkeama on erittäin leveä.

### 1.3 Aiemmat tutkimukset

Tiehallinnossa on tutkittu aiemmin poikkihalkeamien muotoa ja muodonmuutoksia eri vuodenaikoina [Tiehallinto 2001]. Poikkihalkeamien muoto muuttuu usein talvesta kesään edettäessä. Kuvassa 2 on esitetty eräs tapaus, jossa poikkihalkeaman muoto on aivan erilainen verrattaessa talven ja kesän tilannetta.



Kuva 2. Poikkihalkeaman muoto muuttuu usein talvesta kesään edettäessä.

Jatkuvien, epätasaisten poikkihalkeamien haitallisuutta raskaalle liikenteelle selvitettiin talvella 2005-2006 [JP-Transplan Oy 2006]. Kyseisessä työssä selvitettiin toistuvien poikkihalkeamien haitallisuutta ajopaneelin ja kuljettajien haastattelujen avulla sekä selvitettiin mahdollisuuksia poikkihalkeamaepätasaisuuksien tunnistamiseen PTM-auton mittaustuloksista (profiilidata, 100 mm). Datasta ei pystytty määrittämään peräkkäisten profiilipisteiden taseroja peräkkäisten poikkiprofiilien referenssitason erilaisuuden vuoksi. Karkeusarvot puolestaan muuttuvat voimakkaammin liikennemäärän ja päällysteen iän kuin poikkihalkeamaepätasaisuuksien mukaan. Myöskään karkeusarvojen jakaumien muodon perusteella ei voitu päätellä poikkihalkeamien esiintymistä. Lopputuloksena todettiin, että mahdolliset jatkotutkimukset on tehtävä tarkoitusta varten erikseen kerättävällä PTM-aineistolla.

## 1.4 Ajopaneeli

Tämän työn puitteissa järjestettiin ajopaneeli Lappiin neljälle tieosalle toukuussa 2006:

- Tie 81, tieosa 10 (tieosan kasvusuuntaan kaista 1)
- Tie 81, tieosa 11 (tieosan kasvusuuntaan kaista 1)
- Tie 78, tieosa 213 (tieosan kasvusuuntaan kaista 1)
- Tie 78, tieosa 214 (tieosan kasvusuuntaan kaista 1)

Valintaperusteina olivat tienpitäjän tiedossa olevat toistuvat epätasaiset jakso-ot kyseisillä tieosilla. Samoilla tieosilla oli myös jaksoja, joilla poikkihalkeamia ei ollut. Ajopaneelin sopivimmaksi ajankohdaksi määritettiin kevät (vrt. luvussa 1.3 esitetyt seikat).

Ajopaneelissa oli 4 havainnoitsijaa, jotka kirjasivat havaintonsa paperilomakkeille. Paneeli toteutettiin sekä bussilla että henkilöautoilla ja siinä käytettiin seuraavia havaintovälejä:

- 10 m havainnot (tieosat 81/11 ja 78/214) - henkilöautot
- 300 m havainnot (kaikki 4 tieosaa) - bussi

Epätasaisten poikkihalkeamien luokituksena käytettiin seuraavaa jakoa:

- Sietämätön
- Lievä
- Ei epätasaista poikkihalkeamaa

Ajopaneelin ongelmaksi havaittiin paneelin osallistujien erilainen reaktiokyky, joka vaikutti erityisesti 10 m tuloksiin (viive havainnon kirjaamisessa). Lisäksi henkilöiden subjektiivinen näkemys sietämättömästä ja lievästä epätasaisesta poikkihalkeamasta erosi toisistaan.

Kuvassa 3 havainnollistetaan ajopaneelikohteiden poikkihalkeamia.



*Kuva 3. Ajopaneelikohteiden epätasaisia poikkihalkeamia.*



## 1.5 PTM-mittaus

PTM-mittauksessa tuotetaan lasermittaustekniikalla erilaisia tienpinnan kuntoa ja geometriaa kuvaavia tunnuslukuja [Ramboll 2006]. Normaalin tuotantomittauksen avulla tuotetaan tieverkkotason tunnuslukuja ja tarkempi mittaus vaatii erikoisjärjestelyjä. Seuraavassa luettelossa havainnollistetaan eri tapoja mitata dataa ja laskea tunnuslukuja. Tuotantomittauksen tunnuslukuja mitataan, tallennetaan ja lasketaan seuraavassa luettelossa esitetyn mukaisesti:

### *Mittaustulokset*

- Mittauksessa käytettyjen lasereiden antaman datan tulostusväli on <1 mm.
- Mittaustuloksista tuotetaan mittausajoneuvossa reaaliaikainen profiilidata 100 mm/125 mm tulostusvälillä.

### *Datan tallennuksen vaihtoehdot*

- Alemman tason data 1 mm tulostusvälillä, joka sisältää useiden eri mittauslaitteiden tulokset. Tämä on tarkin tallennettava data, mutta vaatii etukäteen tiedon mittauksen tallentamisesta (ei siis tallenneta normaalissa tuotantomittauksessa). Käytettiin tässä tutkimuksessa.
- Tässä tutkimuksessa käytettiin lisäksi erikoistarkan pituusprofiilin tallennusta 50 mm tulostusvälillä. Vaatii tarkemman mittausapahtuman.
- Normaalissa tuotantomittauksessa tallennetaan profiilidata 100 mm tulostusvälillä.

### *Tunnuslukujen laskennan vaihtoehdot*

- Jälkilaskentana toimistossa alemman tason datasta (1 mm tulostusväli). Käytettiin tässä tutkimuksessa.
- Tässä tutkimuksessa käytettiin lisäksi jälkilaskenta toimistossa 50 mm erikoistarkasta pituusprofiilista.
- Reaaliaikaisena mittausajoneuvossa profiilidatasta (100 mm/125 mm tulostusväli). IRI:n laskenta vaatii 125 mm pituusprofiilin.
- Jälkilaskentana toimistossa profiilidatasta (100 mm tulostusväli).

PTM-mittauksen tunnusluvut voidaan jakaa seuraaviin kokonaisuuksiin:

- Pituussuuntaiset parametrit (IRI, RMS epätasaisuus)
- Poikkisuuntaiset parametrit (mm. maksimiura, vesiura, harjanteen korkeus)
- Karkeusparametrit (RMS karkeus eri aallonpituuksilta)
- Geometriaparametrit (sivukaltevuus, pituuskaltevuus, kaarteisuus)

Näistä pituussuuntaiset parametrit ja karkeusparametrit ovat soveltuvia poikkihalkeamien tutkimisessa.

Tieverkon mittauksissa käytetty leveys on 3,2 m. Poikkileikkauksen leveydellä käytetään 17 mittauspistettä. Mittauspisteet on sijoitettu siten, että niitä sijaitsee suhteellisesti enemmän oletetun oikean ja vastaavasti vasemman renkaan ajouran kohdalla. Mittaukset tehdään määrättyillä raportointiväleillä. Tuotantomittauksissa sekä reaaliaikaisesti lasketut parametrit että profiilidata tallennetaan. Tien pinnan korkeutta mitataan jatkuvasti pitkittäissuuntaisen otannon tiheyden ollessa noin 0,5 mm. Pituussuuntaisten parametrien las-

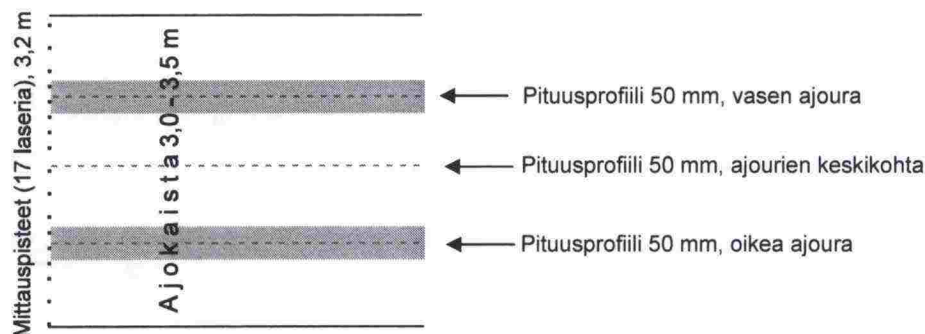
kennassa käytetään 125 mm jaksolle keskiarvoistettuja tien pinnan korkeuslukemia, joista muodostetaan jatkuva pituusprofiili mittausajoneuvossa. Poikkittaisparametrien laskennan perustana käytetään sen sijaan keskimääräistä tien pinnan korkeutta laskettuna 100 mm jaksoissa jokaiselle laseranturin sijainnille (mittauspisteelle).

Aiempien kokemusten perusteella normaalin PTM-datan 100 mm/125 mm jakso (pituussuuntaan) ei riitä epätasaisten poikkihalkeamien havainnointiin. Tämän vuoksi mittaus toteutettiin tarkempaan siten, että pinnan keskimääräinen korkeus saatiin 50 mm jaksoina kolmelta eri tiepoikkileikkauksen kohdalta:

- Vasen ajoura
- Oikea ajoura
- Ajourien keskeltä

PTM-mittaus tehtiin ajopaneelin tieosille huhtikuun lopulla 2006. Lisäksi tehtiin Hämeessä betonitien PTM-mittaus vertailukohtana Lapin tieosien tuloksille. Kuvassa 4 havainnollistetaan mittauksen periaatetta. Normaalissa PTM-tuotantomittauksessa voidaan ajaa muun liikenteen nopeudella. Tarkempi mittaus tehdään pienemmällä nopeudella, n. 30 – 70 km/h.

Poikkihalkeamien luonteen vuoksi PTM-mittauksen kiinnostavia tunnuslukuja ovat pituussuuntaiset tunnusluvut sekä pituusprofiili, joka tarjoaa mahdollisuuksia jatkolaskentoihin.



Kuva 4. PTM-mittauksen periaate. Pituusprofiili muodostetaan mittauspisteiden keskiarvoistetuista korkeuslukemista. Ajorataleveys on tien 81 osalta 6 metriä (3 m ajokaistat) ja tien 78 osalta 7 metriä (3,5 m ajokaistat).

## 1.6 APVM-mittaus

Tiehallinto on teettänyt vuoden 2006 toukokuusta lähtien automaattisia päällysteiden vauriomittauksia (APVM). Vauriomittaus perustuu päällysteen pinnasta otettujen kuvien kuvatulkintaan, jonka tuloksena saadaan detaljitietoa halkeamista sekä tilastollisia tunnuslukuja. Itse mittaustapahtuma on siis

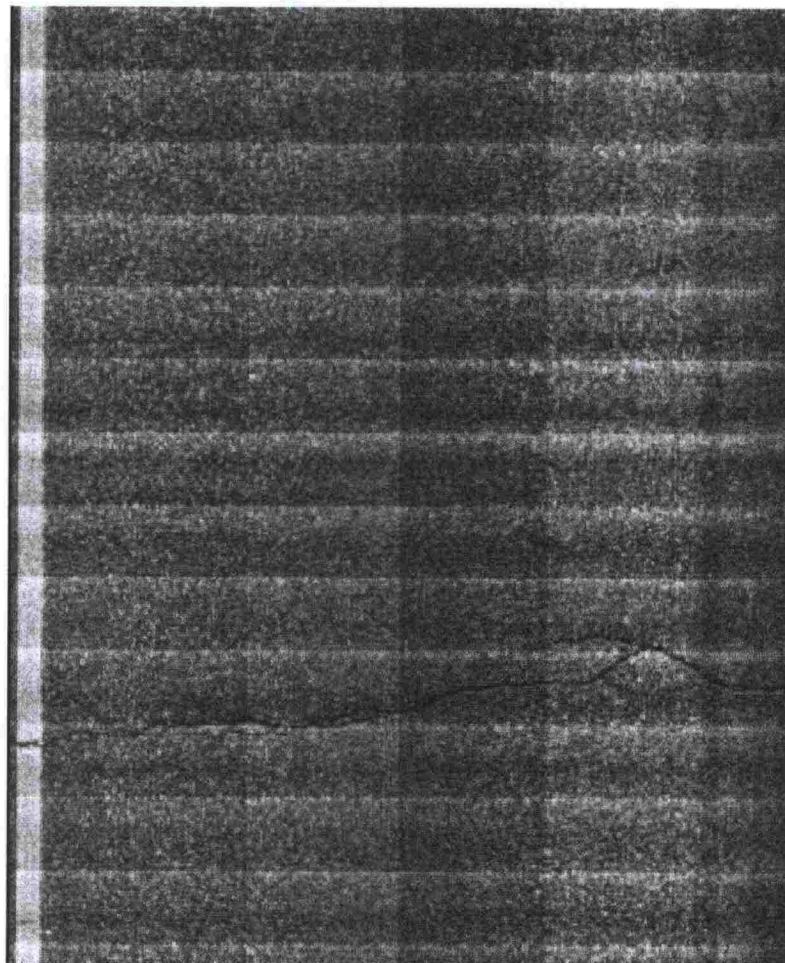


päällysteen kuvaamista ja varsinainen tunnuslukujen laskenta tapahtuu toimistossa kuvatulkinnan avulla. Mittausleveys on 3,5 m. Kuvassa 5 on esitetty mittauksesta saatu rasterikuva päällysteen pinnasta.

Kuvatulkinnan jälkeen APVM:sta saadaan tulosteina:

- Vauriokartat, jotka näyttävät halkeamien sijainnin 10 m tulostusvälein
- 100 m tunnusluvut, % (6 erilaista vaurio-osuus -tunnuslukua (mm. koko ajokaista, oikea ajoura ja vasen ajoura)
- 10 m tunnusluvut, % (vastaavat kun 100 m datassa)

APVM-mittaus toteutettiin ajopaneelin neljälle tieosalle Lapissa kesäheinäkuun vaihteessa 2006. Lisäksi mitattiin PTM:n tapaan Hämeessä betonitie. Tämän tutkimuksen näkökulmasta kiinnostavin seikka APVM:n tulosteissa ovat vauriokartat, joiden avulla on mahdollista paikallistaa poikkihalkeamat.



Kuva 5. APVM-mittauksesta saatua rasterikuvaa päällysteen pinnasta.  
Analysoinnissa käytettävät kuvat koostetaan pienemmistä kuvista.



## 2 AJOPANEELIN JA MITTAUSTEN TULOKSET

### 2.1 Ajopaneelin tulokset

Toukokuussa 2006 pidetyn ajopaneelin tuloksina saatiin 10 m välein tehtyjen havaintojen tulokset tien 81 tieosalta 11 ja tien 78 tieosalta 214 sekä 300 m havaintojen tulokset kaikilta neljältä ajopaneelikohteelta.

#### 10 m tulokset

Kymmenen metrin välein saadut tulokset vaihtelivat henkilöittäin, riippuen havainnoitsijan reaktioajasta ja toisaalta näkemyksestä *sietämättömän* ja *lievän* epätasaisen poikkihalkeaman välillä. Tästä syystä 10 m tuloksista haettiin ne kohdat, joissa vähintään kolme havainnoitsijaa neljästä oli samaa mieltä (sekä poikkihalkeamakohdat että kohdat, joissa ei ollut epätasaisia poikkihalkeamia) ja katsottiin tämän antavan riittävän hyvän valta-arvon 10 m havainnoille. Jaksojen pituus oli keskimäärin 20 - 30 m. Reaktioaikojen erilaisuudesta johtuen annettiin havainnoille 10...30 m liukuma. Ajonopeudella 60 km/h ajoneuvo etenee n. 17 m sekunnissa. Taulukossa 1 on esitetty esimerkki ajopaneelin suodatetuista tuloksista tien 81 tieosalta 11.

Toisena mahdollisuutena olisi ollut käyttää esimerkiksi 40 m täsmällistä jaksotusta ja hakea jokaiselta jaksolta valta-arvo. Tästä kuitenkin luovuttiin em. reaktioaikojen erilaisuuden vuoksi. Yksinkertaisessa jaksotuksessa selkeästi samaa epätasaista poikkihalkeamaa tarkoittavat havainnot saattoivat joutua eri jaksoihin.

*Taulukko 1. Esimerkki ajopaneelin 10 m havaintojen käsittelystä. Jaksot, joissa vähintään kolme neljästä havainnoitsijasta on samaa mieltä, on hyväksytty. Havainnoille on annettu maksimissaan 30 m liukuma reaktioajan vuoksi.*

| Tie 81, tieosa 11 | Havainnoitsija 1          |                      | Havainnoitsija 2          |                      | Havainnoitsija 3          |                      | Havainnoitsija 4          |                      |
|-------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
|                   | Sietämätön poikkihalkeama | Lievä poikkihalkeama | Sietämätön poikkihalkeama | Lievä poikkihalkeama | Sietämätön poikkihalkeama | Lievä poikkihalkeama | Sietämätön poikkihalkeama | Lievä poikkihalkeama |
| Paaluväli         |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3550 - 3560       |                           |                      |                           |                      |                           |                      | 1                         |                      |
| 3560 - 3570       |                           |                      | 1                         |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3570 - 3580       |                           |                      |                           |                      | 1                         |                      |                           |                      |
| 3580 - 3590       |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3590 - 3600       |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3600 - 3610       |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3640 - 3650       |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3650 - 3660       |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3660 - 3670       |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3670 - 3680       |                           |                      |                           | 1                    |                           | 1                    |                           |                      |
| 3680 - 3690       | 1                         | 1                    |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3750 - 3760       |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3760 - 3770       |                           |                      |                           |                      |                           |                      |                           |                      |
| 3800 - 3810       |                           |                      |                           |                      |                           |                      | 1                         |                      |
| 3810 - 3820       | 1                         |                      | 1                         |                      |                           |                      |                           |                      |

Edellä kuvatulla menetelmällä saatiin yhtenäisiä 10 m jaksoja suodatettua seuraavasti (tien 81 tieosa 11 ja tien 78 tieosa 214):

- 46 sietämätöntä kohtaa
- 2 lievää kohtaa
- 188 kohtaa, jossa ei havaittu epätasaisista poikkihalkeamaa

Sietämättömien ja lievien jaksojen pituus oli 10...40 m, tyypillisesti 20 tai 30 m. Lievien epätasaisien poikkihalkeamien yhtenäisten havaintojen vähyys kuvastaa vaikeutta luokitella pienempiä epätasaisuuksia asteikolla. Toisaalta niiden sietämättömien jaksojen määrä, joilla kolme neljästä havainnoitsijasta oli samaa mieltä, on tilastollisesti riittävä.

### 300 m tulokset

Ajopaneelissa 300 m matkalla tehtyjen havaintojen lähtökohtana oli kirjata havainnoitsijakohtaisesti sietämättömien epätasaisien poikkihalkeaminen määrä kullakin 300 m jaksolla. Tämä testi tehtiin kaikille neljälle ajopaneeli-kohteelle.

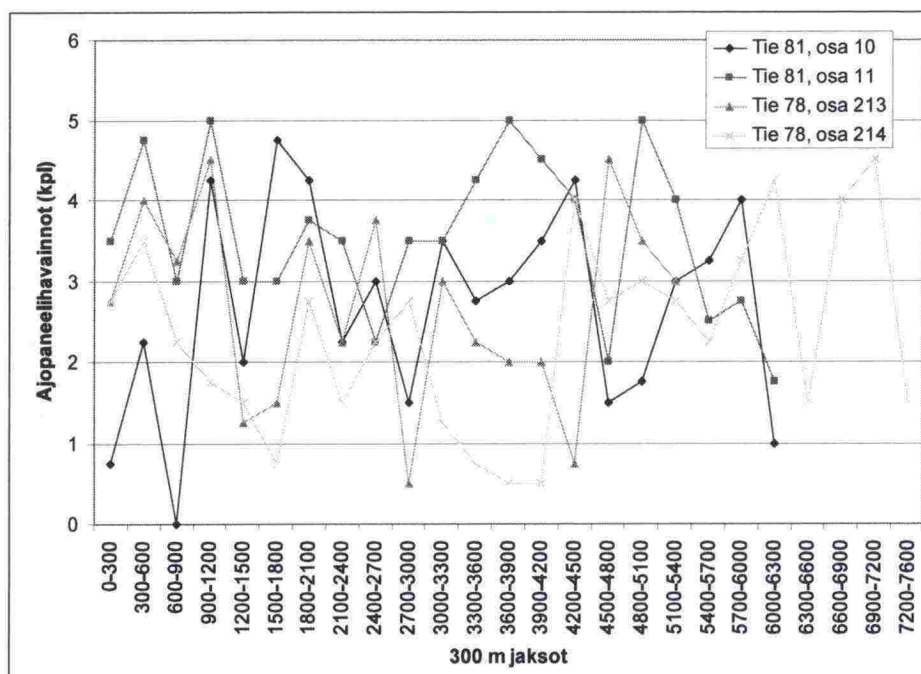
Tulosten käsittelyssä annettiin jokaiselle 300 m jaksolle neljän havainnoitsijan kirjaamien sietämättömien poikkihalkeamien määrän keskiarvo. Taulukossa 2 on esitetty esimerkki tulosten käsittelystä tien 81 tieosalla 11 ja taulukossa 3 neljälle tieosalle saadut ajopaneelihavaintojen määrät sietämättömistä poikkihalkeamista 300 m jaksoina. Kuvassa 6 on havainnollistettu kaikkien neljän tieosan havaintojen määrää (keskiarvot) tieosittain 300 jaksoina.

*Taulukko 2. Esimerkki 300 m tulosten käsittelystä. Sietämättömien epätasaisien poikkihalkeamien määrästä on otettu keskiarvo neljän havainnoitsijan välillä.*

| Tie 81, osa 11<br>Paaluväli | Havainnoitsija 1 | Havainnoitsija 2 | Havainnoitsija 3 | Havainnoitsija 4 | Keskiarvo |
|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|
| 0-300                       | 2                | 2                | 5                | 5                | 4         |
| 300-600                     | 4                | 6                | 4                | 5                | 5         |
| 600-900                     | 3                | 2                | 3                | 4                | 3         |
| 900-1200                    | 4                | 5                | 4                | 7                | 5         |
| 1200-1500                   | 2                | 2                | 5                | 3                | 3         |
| 1500-1800                   | 2                | 2                | 3                | 5                | 3         |
| 1800-2100                   | 4                | 3                | 4                | 4                | 4         |
| 2100-2400                   | 3                | 3                | 4                | 4                | 4         |
| 2400-2700                   | 2                | 2                | 2                | 3                | 2         |
| 2700-3000                   | 3                | 3                | 4                | 4                | 4         |
| 3000-3300                   | 2                | 2                | 5                | 5                | 4         |
| 3300-3600                   | 3                | 2                | 5                | 7                | 4         |
| 3600-3900                   | 4                | 4                | 6                | 6                | 5         |
| 3900-4200                   | 3                | 3                | 6                | 6                | 5         |
| 4200-4500                   | 2                | 1                | 7                | 6                | 4         |
| 4500-4800                   | 2                | 1                | 2                | 3                | 2         |
| 4800-5100                   | 5                | 4                | 5                | 6                | 5         |
| 5100-5400                   | 3                | 3                | 4                | 6                | 4         |
| 5400-5700                   | 2                | 2                | 2                | 4                | 3         |
| 5700-6000                   | 1                | 2                | 3                | 5                | 3         |
| 6000-6272                   | 1                | 1                | 2                | 3                | 2         |

Taulukko 3. Ajopaneelin sietämättömien poikkihalkeamien määrät 300 m jaksoille tieosittain.

|                               | Tie 81    |           | Tie 78     |            |
|-------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
|                               | Tieosa 10 | Tieosa 11 | Tieosa 213 | Tieosa 214 |
| Ajopaneelihavaintojen määrä   | 58        | 78        | 52         | 63         |
| Havaintojen keskiarvo / 300 m | 2,8       | 3,7       | 2,9        | 2,5        |
| Pienin kappalemäärä / 300 m   | 0         | 2         | 1          | 1          |
| Suurin kappalemäärä / 300 m   | 5         | 5         | 5          | 5          |



Kuva 6. Sietämättömien epätasaisten poikkihalkeamien havaintojen määrät (keskiarvot) tieosittain 300 m jaksoina.

Tien 78 tieosan 214 osalta saatiin suurimmat eroavuudet neljän havainnoitsijan kesken: pienin havaittu määrä oli 28 ja suurin 92. Muilla tieosilla erot olivat pienempiä. Kuva-aineiston perusteella suurin määrä vastaa melkein kaikkia poikkihalkeamia (epätasaiset ja tasaiset kohdat) koko tieosalla. Yleinen mielipide antoi kuitenkin ymmärtää, että tien 78 tieosilla oli selkeästi vähemmän sietämättömän epätasaisia poikkihalkeamia kuin tien 81 tieosilla. Keskiarvot tukevat tätä mielipidettä.

## 2.2 Mittausdatan kohdistaminen

Lapin ajopaneelikohteille tehtyjen PTM- ja APVM-mittaustulosten perusteella mittausten alku- ja loppupisteet vastaavat toisiaan erittäin tarkasti, sen sijaan mittauspituuksissa on pieni ero.



Eräänä selittäjänä voidaan pitää PTM-mittauksen ja APVM-mittauksen ajo-  
linjoja, jotka eroavat hiukan toisistaan mittaustapahtumassa:

- PTM seuraa koko ajan urien suuntaa
- APVM:n mittaussleveys täyttää koko kaistan ja pysyy kaistan keskellä

Tällöin mittauspituuteen tulee ero lähinnä kaarteissa. Vielä merkittävämpänä  
selittäjänä voidaan pitää liikennetilanteita. Hitaamman ajoneuvon (esimer-  
kiksi tien reunassa kulkeva polkupyörä) ohittaminen vaatii ajolinjan pientä  
muuttamista, joka voi vaikuttaa useita metrejä. Tämä onkin realistisempi se-  
littäjä mitatuilla tieosilla, koska niihin ei sisälly kovin paljon kaarteita (erityi-  
sesti tie 78) ja koska tieosan suurempi mittauspituus vaihtelee PTM:n ja  
APVM:n kesken tieosittain.

Loppupisteessä saadun mittauspituuden perusteella erot eri mittauksissa  
ovat välillä 10 - 30 m. Tämä antaa kuitenkin vain osatotuuden, koska mitta-  
usten alussa eroa pituudessa ei juurikaan ole. PTM-tunnuslukujen korkeiden  
arvojen vertailulla APVM-mittauksen vauriokarttoihin saatiin taulukossa 4  
esitetyt erot mittauspituuksiin. Näitä eroja on käytetty mittaustulosten kohdis-  
tamisessa.

*Taulukko 4. PTM- ja APVM-mittauksen pituusero mittauksen alkuvaiheessa  
ja mittauksen lopussa.*

|   | Tie 81    |           | Tie 78     |            |
|---|-----------|-----------|------------|------------|
|   | Tieosa 10 | Tieosa 11 | Tieosa 213 | Tieosa 214 |
| PTM- ja APVM-mittauksen ero ensimmäisen 200<br>m jälkeen tunnuslukujen mukaan | 4-7 m     | 1-2 m     | 6-7 m      | 4-6 m      |
| PTM- ja APVM-mittauksen ero tieosan lopussa<br>tunnuslukujen mukaan           | 13-16 m   | 8-10 m    | 15-16 m    | 13-20 m    |
| Mitatun pituuden ero  | 20 m      | 11 m      | 16 m       | 29 m       |

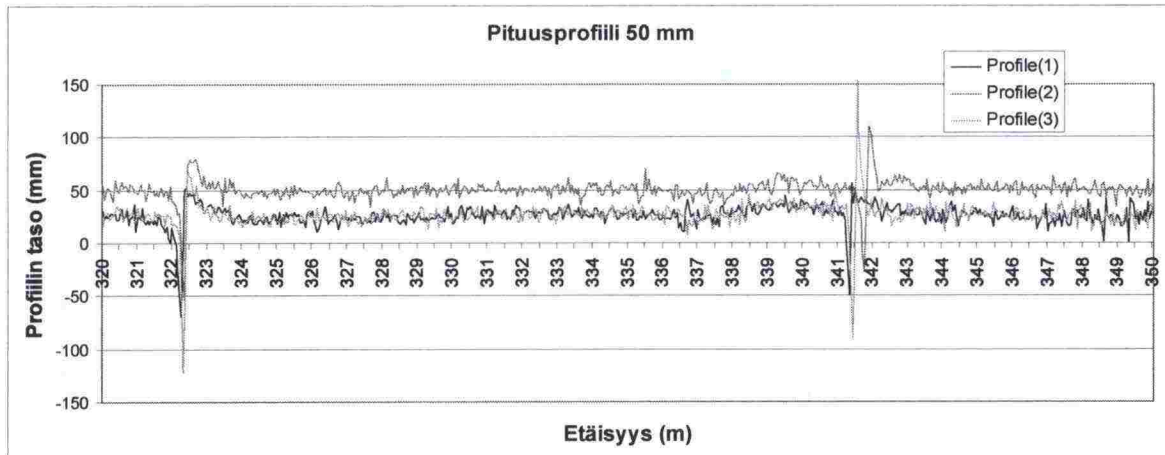
## 2.3 PTM-mittausdata

Tutkimusta varten saatiin PTM-mittausdatana seuraavat:

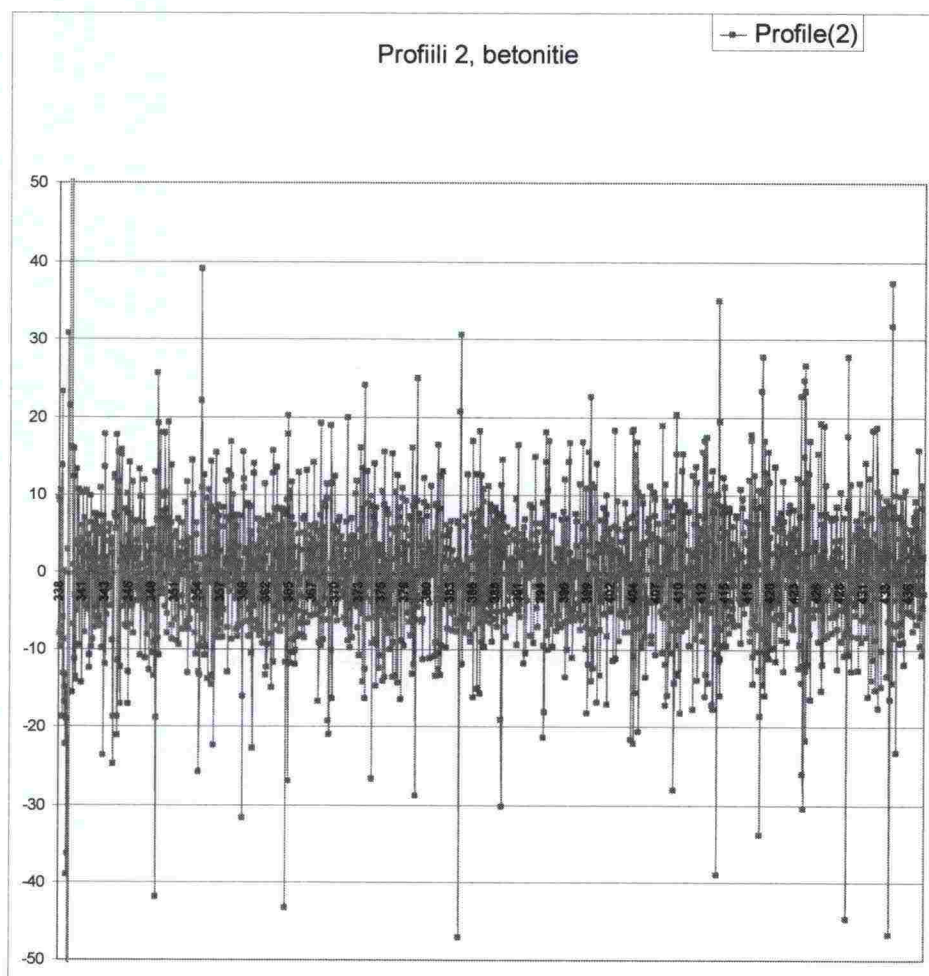
- Pituusprofiili 50 mm tulostusvälillä (laskettuna reaaliaikaisesti mitta-  
ustapahtumassa, <1mm tulostusväli)
- IRI 50 mm tulostusvälillä (laskettuna 50 mm pituusprofiilista)
- MPD 100 mm tulostusvälillä (laskettuna 1 mm alemman tason datas-  
ta)

Pituusprofiilin paras käyttötarkoitus on toimia muiden parametrien laskennan  
lähtötietona sekä laskenta-algoritmien avulla tuotettavien datojen lähtötieto-  
na. Näitä laskenta-algoritmeja ja niiden tuotoksia esitellään luvussa 2.5. Pi-  
tuusprofiilidata on melko massiivista rivimäärältään. Esimerkiksi Lapin ajo-  
paneelikohteiden yhdenkään tieosan profiilidata ei mahdu Excelin laskenta-  
taulukkoon ja pisimmät tieosat vaativat 3 taulukkoa. Profiilidata kuvaa yksin-  
kertaisesti laserien antamia korkeuslukemia, jotka on laskettu reaaliaikaisesti  
mittaustapahtumassa. Profiililukemien taso ei merkitse mitään, sen sijaan  
tärkeämpää on peräkkäisten lukemien vaihtelu. Kuvassa 7 on esimerkkinä  
Tien 81 tieosan 11 profiilidataa 10 metrin matkalta sekä vertailuna kuvassa 8

Hämeen betonitien (tie 9, tieosa 204) pituusprofiililukemia vajaan 100 m matkalta (kuvassa selkeyden vuoksi vain toisen profiilin lukemia). Betonitien mitauksessa mitattiin profiilit vain ajourien kohdalta.

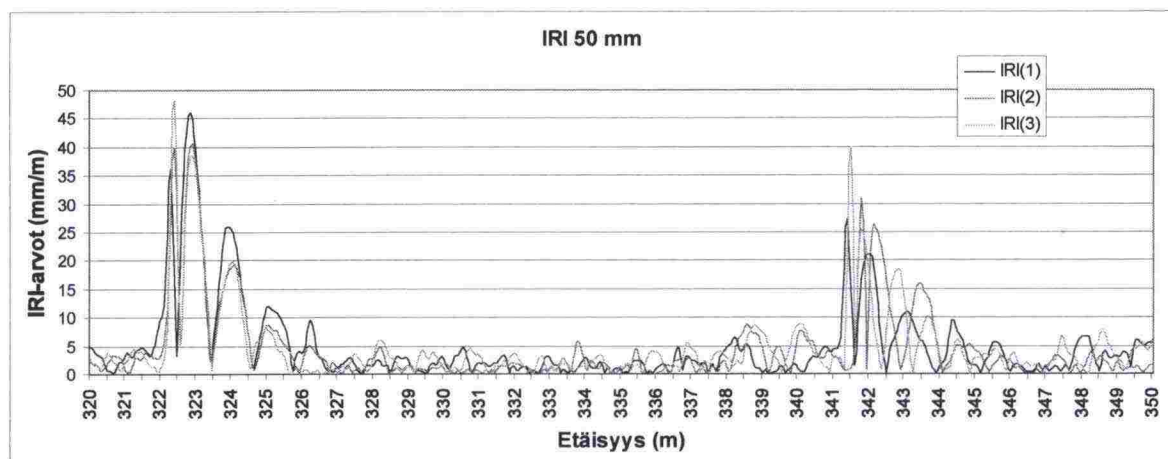


Kuva 7. Osa pituusprofiilista tien 81 tieosalla 11. Kohdassa 322 m on epätasainen poikkihalkeama ja kohdassa 342 vinohalkeama.



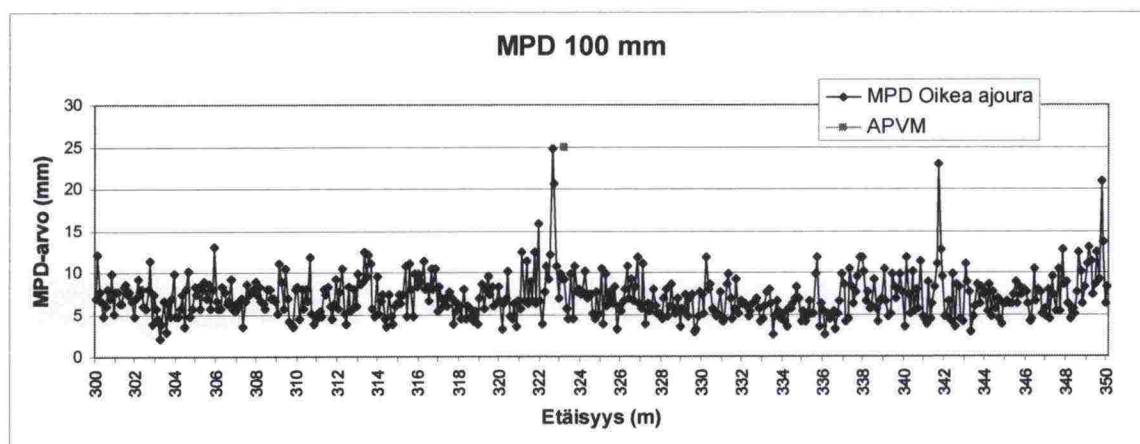
Kuva 8. Osa pituusprofiilista (n. 70 m) betonitiellä. Profiilin matalista ja korkeista arvoista erottuvat ajoittain selkeästi 5 m betonilaattojen saumakohdat. Yhdessä 50 mm pituusprofiilin kanssa saatiin pituusprofiilin avulla lasketut 50 mm IRI-arvot. IRI on epätasaisuuksiin reagoiva parametri ja kuvaa kuinka epätasaisuudet vaikuttavat ajoneuvon liikehdintään. IRI:n ongelma nimenomaan epätasaisien poikkihalkeamien suhteen on, että se näyttää suuria arvoja minkä tahansa epätasaisuuden kohdalla. Kuvassa 9 on esitetty IRI 50 mm arvot samalta kohdalta kuin pituusprofiili kuvassa 7.





Kuva 9. IRI 50 mm arvot samalta tienkohdalta kuin kuva 7.

MPD (Mean Profile Depth) 100 mm arvot saadaan tarkemman PTM-mittauksen yhteydessä talletetusta alemman tason datasta (tarkkuus 1 mm). MPD on kaksikulotteinen mitta ja lasketaan alueelta joka vastaa autonrenkaan ja tienpinnan kosketusalaa. MPD vastaa keskimääräistä profiilisyvyyttä tietyllä välillä ja samalla myös suurin piirtein päällysteen karkeuden aallonpituuksia makrokarkeus hieno (aallonpituus 1-10 mm) ja makrokarkeus karkea (aallonpituus 10-100 mm). MPD-arvot kuvaavat tien pinnan todellista geometrista muutosta. Kuvassa 10 on esitetty MPD-arvoja vastaavalta kohdalta kuin kuvissa 7 ja 9.



Kuva 10. MPD 100 mm arvoja vastaavalta kohdalta kuin kuvat 7 ja 9. Punainen merkki osoittaa APVM-mittauksessa todetun poikkihalkeaman, kohdassa 342 on vinohalkeama ja kohdassa 350 lyhyt halkeama.

Taulukossa 5 on esitetty MPD:n ja IRI 50 mm määriä Lapin ajopaneelikoh-teilla sekä Hämeen betoniteillä. Taulukosta havaitaan, että ainakin IRI 50 mm raja-arvon ylittävien määrät ovat kertaluokkaa suuremmat betoniteillä. MPD vaikuttaa toimivan hyvin molemmilla päällystetyypeillä.

Taulukko 5. MPD:n ja IRI 50 mm määriä muutamilla raja-arvoilla Lapin ajo-paneelikohteilla sekä Hämeen betoniteillä.

| Tieosat              | MPD-määrät<br>>20 mm | MPD-määrät<br>>30 mm | MPD-määrät<br>>40 mm | IRI50mm-määrät<br>>40 mm/m | IRI50mm-määrät<br>>50 mm/m | IRI50mm-määrät<br>>60 mm/m |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 81-10                | 123                  | 20                   | 4                    | 530                        | 211                        | 111                        |
| 81-11                | 157                  | 41                   | 16                   | 311                        | 110                        | 39                         |
| 78-213               | 53                   | 12                   | 7                    | 149                        | 58                         | 15                         |
| 78-214               | 63                   | 6                    | 1                    | 240                        | 120                        | 21                         |
| 3-106-ajor1-kaista1  | 67                   | 11                   | 3                    | 5508                       | 3426                       | 1844                       |
| 3-106-ajor1-kaista2  | 73                   | 15                   | 8                    | 10385                      | 5547                       | 3222                       |
| 9-204-ajor1-kaista 1 | 25                   | 6                    | 2                    |                            |                            | 937                        |
| 9-204-ajor1-kaista 2 | 30                   | 7                    | 4                    |                            |                            | 217                        |
| 9-204-ajor2-kaista 1 | 3                    | 1                    | 1                    |                            |                            | 1036                       |
| 9-204-ajor2-kaista 2 | 35                   | 5                    | 3                    |                            |                            | 572                        |
| 9-205-ajor1-kaista 1 | 26                   | 3                    | 2                    |                            |                            | 808                        |
| 9-205-ajor1-kaista 2 | 298                  | 15                   | 3                    |                            |                            | 535                        |
| 9-205-ajor2-kaista 1 | 9                    | 4                    | 1                    |                            |                            | 668                        |
| 9-205-ajor2-kaista 2 | 50                   | 8                    | 5                    |                            |                            | 444                        |

## 2.4 APVM-mittausdata

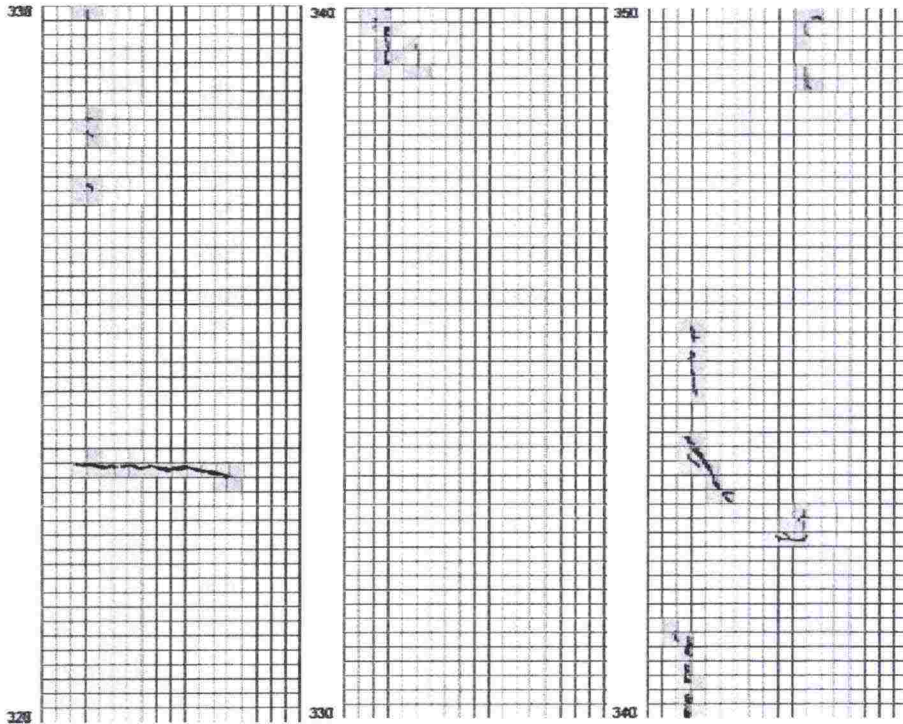
Tutkimusta varten saatiin APVM-mittauksesta kuvatulokinnan avulla tuotetut vauriokartat, jotka osoittavat selkeiden poikkihalkeamien paikat. Vauriokartat eivät välttämättä osoita erittäin ohuita poikkihalkeamia, koska halkeaman kohdalla ei ole riittävää värieroa muuhun päällysteeseen verrattuna. Lisäksi osa poikkihalkeamista oli paikattuja ja paikkauksen väri ei sekään eroa muusta päällysteestä, jolloin kuvatulokinta ei löydä halkeamaa (mikä on oikea tulos, koska tässä tapauksessa halkeamaa ei ole). Ajopaneelissa sen sijaan paikattu kohta on usein kuitenkin tulkittu epätasaiseksi poikkihalkeamaksi, jos kyseinen kohta on epätasainen.

Kuvassa 11 on kolme APVM:n 10 metrin vauriokarttaa tien 81 tieosalta 11, kohdalta 320-350 m.

Poikkihalkeamakohdat määritettiin APVM-vauriokartoista siten, että hal-keaman tuli ulottua molemmille ajourille. Kuvan 11 tapauksessa poikkihal-keamaksi määritettiin kohta 323 m, mutta kohdassa 342 ei ole poikkihal-keamaa. Selkeitä poikkihalkeamia määritettiin seuraavat määrät neljälle tie-osalle:

- Tie 81, tieosa 10: 58 poikkihalkeamaa
- Tie 81, tieosa 11: 102 poikkihalkeamaa
- Tie 78, tieosa 213: 26 poikkihalkeamaa
- Tie 78, tieosa 214: 5 poikkihalkeamaa

Tiheimmin selkeitä poikkihalkeamia esiintyi APVM-vauriokartoissa muutamilla jaksoilla noin 20-70 metrin välein tien 81 tieosilla 10-11. Keskimäärin (koko tieosapituuden huomioiden) poikkihalkeamia löytyi APVM:n mukaan tien 81 tieosalla 10 noin 100 metrin välein ja tieosalla 11 noin 60 metrin välein.



Kuva 11. Kolme APVM:n vauriokarttaa vastaavalta kohdalta kuin kuvissa 7, 9 ja 10.

APVM-mittauksen yhteydessä otetaan myös etukameran kuvia tiestä. Kuvassa 12 on esitetty näkymä tien 81 tieosalta 11. Kuvan 11 halkeama ja kuvien 7, 9 ja 10 yhteydessä mainittu vinohalkeama näkyvät hyvin. Samalla havaitaan miten varjot peittävät kuvassa oikean puoleisen kaistan, vaikeuttaen halkeamien havainnointia etukameran kuvista. Tämän vuoksi kuvat ainoastaan tukivat vauriokarttojen tietoa.





Kuva 12. APVM-mittauksen yhteydessä otettu etukameran kuva tien 81 tieosalta 11, vastaavalta kohdalta kuin kuvissa 7,9,10 ja 11.

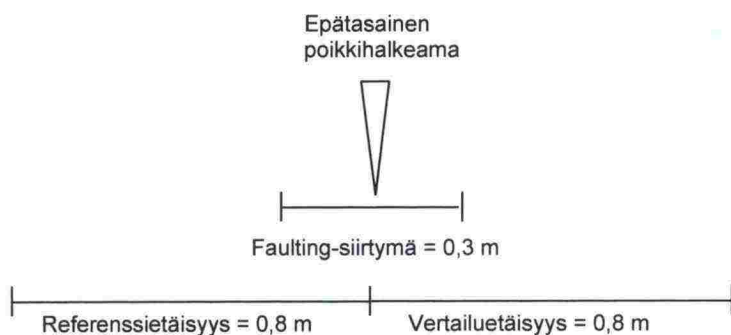
## 2.5 Laskenta-algoritmien avulla saadut datat

Tutkimuksessa kokeiltiin kahta erilaista laskenta-algoritmia epätasaisen poikkihalkeamien havainnointiin:

- Faulting-algoritmi (laskettuna 1 mm alemman tason datasta)
- Tasoeroalgoritmi (laskettuna 50 mm pituusprofiilista)

**Faulting-algoritmi** on Rambollin vuosia aiemmin kehittämä laskenta-algoritmi nimenomaan betonipäällysteisten teiden saumakohtien epätasaisuuksien löytämiseen. Faultingin lähtötietona käytetään 1 mm alemman tason dataa. Tämä tarkoittaa, että Faulting-laskenta voidaan tehdä jälkilaskentana miltä tahansa mitatulta tieltä, jonka alemman tason data on talletettu. Tässä tulee huomioida, että alemman tason dataa ei talleteta tuotantomittauksissa, jos tallennusta ei pyydetä. Tallennuskapasiteetin riittävyyttä verkkotason tallennuksiin ei ole selvitetty tässä tutkimuksessa. Faultingin laskentametodiikkaa on selvitetty liitteenä 1 olevassa ohjeessa ja kuvassa 13. Laskentatapa on yksinkertaistettuna seuraava:

*Faulting-epätasaisuudet haetaan vertaamalla peräkkäisiä tien pinnan korkeusarvoja. Faulting-arvoja haetaan 0,8 metrin vertailuetaisyydellä (arvoja ei kirjata 0,8 m tiheämmin). Faulting-siirtymänä käytetään 0,3 metriä (vrt. poikkihalkeaman vinous/leveys). Faulting-arvo kirjautuu tulostiedostoon, kun molemmilta ajourilta löytyy minimikynnysarvon ylittävä arvo. Arvot voivat olla negatiivisia (laskeva tasoero) tai positiivisia (nouseva tasoero). Faulting-arvo ilmaisee poikkihalkeaman reunojen korkeuseron.*



Kuva 13. Faulting-laskennassa käytettävät etäisyydet. Faulting-arvoja kirjataan minimissään 0,8 m välein.

Faulting-tulostiedostoon kirjautuvat vain määritetyn korkeusarvon ylittävät korkeuserot. Tutkimuksen dataan kirjattiin varmuuden vuoksi kaikki >0 mm korkeuserot. Tulosten perusteella realistinen raja-arvo tulosten esittämiseen olisi >5 mm. Tällöin saadaan tulostiedoston rivimäärää pienemmäksi. Muutamien millimetrin korkeuseroilla ei ole suurta merkitystä.

Faulting-tulostiedostoon kirjautuvat oikean ja vasemman ajouran tulokset. Taulukossa 6 on esimerkki tien 81 tieosalta 11.

Taulukko 6. Esimerkki Faulting-algoritmin tuloksista tien 81 tieosalla 11. Tulokset saadaan molemmille ajourille. N/P kertoo onko korkeusero laskeva vai nouseva. Taulukosta on suodatettu pois alle 5 mm korkeuseroja sisältävät rivit.

| Road | Section | Direction | Lane | Distance | Faulting Left | Faulting Right | N/P |
|------|---------|-----------|------|----------|---------------|----------------|-----|
| 81   | 11      | 1         | 1    | 119.69   | -2.1021       | -7.65821       | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 171.59   | -2.51615      | -13.37981      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 238.6    | -9.6824       | -19.010775     | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 263.8    | -2.3569       | -5.166277      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 292.09   | -2.8665       | -12.405995     | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 298.19   | -6.01965      | -2.642451      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 322.29   | -4.49085      | -22.311037     | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 345.49   | -2.0384       | -7.705363      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 346.79   | -1.75175      | -8.4683        | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 402.89   | -2.77095      | -5.64697       | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 416.59   | -12.07115     | -9.239227      | P   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 428.09   | -2.26135      | -5.370556      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 439.79   | -1.5925       | -6.451111      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 448.49   | -5.38265      | -16.726192     | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 457.49   | -3.9494       | -6.960676      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 466.49   | -4.1405       | -7.320346      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 492.89   | -1.30585      | -7.097198      | P   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 523.29   | -3.1213       | -7.956891      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 526.19   | -12.2941      | -28.26404      | P   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 534.49   | -6.27445      | -15.198221     | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 579.09   | -5.5419       | -6.422259      | N   |
| 81   | 11      | 1         | 1    | 580.1    | -1.62435      | -6.542971      | N   |

Faultingin löytämien korkeuserojen määrää vasemmassa ja oikeassa ajourassa on havainnollistettu taulukossa 7. Taulukon nolla-arvo kertoo siis vain sen löytykö raja-arvon ylittäviä kohtia, sillä esimerkiksi alle 10 mm arvoja löytyy kaikilta tieosilta. Lapin asfalttiteiden vasemmassa ajourassa on vähemmän ylittäviä arvoja, minkä voi tulkita johtuvan mm. uraisuudesta. Tutkitavien tieosien liikennemäärät eivät ole kovin suuria (tie 81 KVL = 600 ja tie 78 KVL = 1500-2000). Tieosilla oli kuitenkin havaittavissa selkeitä uria, jotka johtunevat painumisesta (vrt. kuva 3). Betonitiellä olevat nolla-arvot johtuvat siitä, että betonilaatat ovat auki vain toisesta reunasta (ilmeisesti laatan tasoero on myös tällaisissa tapauksissa toispuoleinen) tai vaihtoehtoisesti kulumisen vuoksi.

Taulukko 7. Faulting-arvojen määrä muutamalla raja-arvolla. Alemmilla riveillä on betonitien 3- ja 9-tien ajokaistojen tulokset.

| Tieosat              | Faulting-määrät (>10 mm) |       | Faulting-määrät (>15 mm) |       | Faulting-määrät (>20 mm) |       |
|----------------------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|
|                      | Vasen                    | Oikea | Vasen                    | Oikea | Vasen                    | Oikea |
| 81-10                | 22                       | 53    | 7                        | 27    | 4                        | 14    |
| 81-11                | 32                       | 78    | 15                       | 42    | 3                        | 24    |
| 78-213               | 0                        | 12    | 0                        | 5     | 0                        | 2     |
| 78-214               | 0                        | 41    | 0                        | 17    | 0                        | 4     |
| 3-106-ajor1-kaista1  | 42                       | 0     | 18                       | 0     | 7                        | 0     |
| 3-106-ajor1-kaista2  | 119                      | 3     | 42                       | 0     | 19                       | 0     |
| 9-204-ajor1-kaista 1 | 1                        | 0     | 0                        | 0     | 0                        | 0     |
| 9-204-ajor1-kaista 2 | 5                        | 0     | 3                        | 0     | 0                        | 0     |
| 9-204-ajor2-kaista 1 | 7                        | 0     | 1                        | 0     | 0                        | 0     |
| 9-204-ajor2-kaista 2 | 2                        | 0     | 0                        | 0     | 0                        | 0     |
| 9-205-ajor1-kaista 1 | 14                       | 0     | 4                        | 0     | 3                        | 0     |
| 9-205-ajor1-kaista 2 | 5                        | 0     | 0                        | 0     | 0                        | 0     |
| 9-205-ajor2-kaista 1 | 4                        | 0     | 0                        | 0     | 0                        | 0     |
| 9-205-ajor2-kaista 2 | 7                        | 0     | 1                        | 0     | 0                        | 0     |

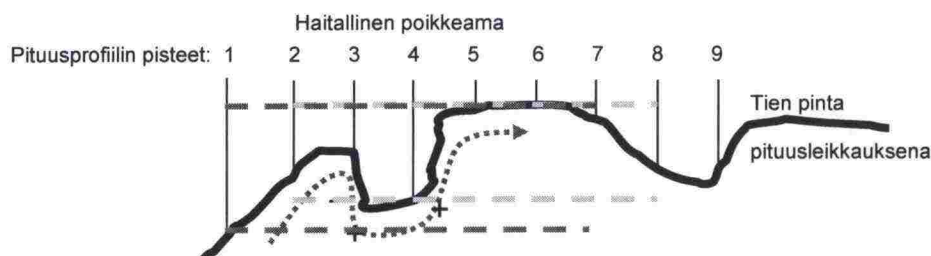
**Tasoeroalgoritmi** on tätä tutkimusta varten kehitetty laskenta-algoritmi. Tasoeroalgoritmin lähtötietona käytetään 50 mm pituusprofiilidataa. Algoritmin laskentaperiaate on seuraava:

Seitsemää peräkkäistä pituusprofiilin pistettä verrataan ja laskenta etsii kahden erillisen pisteen suurimman korkeuseron, matalimman ja korkeimman profiililukeman avulla. Laskenta siirtyy yhden profiilipisteen eteenpäin ja vertaa jälleen 7 peräkkäistä profiilipistettä jne. profiilin loppuun saakka. Laskenta siivoaa tulokset 0,5 m matkalla ja kirjaa tuloksiin vain suurimman korkeuseron kyseisellä välillä.

Kuvassa 14 selvennetään tasoeroalgoritmin laskentaa. Seitsemän peräkkäistä profiililukemaa tarkoittaa 0,35 m etäisyyttä. Tasoeron minimiarvona laskennassa käytettiin 20 millimetriä.

Tasoerot tulostuvat laskentaohjelman prototyypistä kullekin profiilille erikseen, minkä vuoksi määrien laskeminen kokonaisuutena on vaikeaa. Tässä mielessä laskentaohjelmaa tulisi kehittää edelleen. Periaatteessa yhdenkin tulostiedoston määrien arviointi antaa kuitenkin riittävän selkeän kuvan. Taulukossa 8 on laskelma tasoerojen määristä ajourien välissä (profiili 2).





Kuva 14. Taseroalgoritmin laskentatapa: 7 peräkkäisen profiililuvun vertailu ja kahden suurimman arvon erotuksen tulostaminen, jos annettu raja-arvo ylittyy. Tässä esimerkissä laserkohdat 1 ja 6 antavat suurimman arvon 1. laskentakierroksella pisteiden 1-7 välillä (punaiset katkoviivat), 2. laskentakierroksella pisteiden 2-8 välillä laserkohdat 4 ja 6 (oranssit katkoviivat) ja kolmannella laskentakierroksella pisteiden 3-9 välillä myös kohdat 4 ja 6. Laskenta siivoaa kuitenkin 0,5 m etäisyydellä olevat havainnot siten, että suurin jää tulostiedostoon.

Taulukko 8. Taserojen määrä raja-arvoilla 20 mm - 40 mm Lapin tieosien ajourien välisellä profililla ja Hämeen betonitien oikeassa ajourassa.

| Tieosat              | Taseroalgoritmilla saadut määrät |        |        |        |        |
|----------------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                      | >20 mm                           | >25 mm | >30 mm | >35 mm | >40 mm |
| 81-10                | 201                              | 105    | 67     | 51     | 39     |
| 81-11                | 333                              | 203    | 141    | 115    | 80     |
| 78-213               | 145                              | 83     | 50     | 27     | 17     |
| 78-214               | 170                              | 83     | 58     | 42     | 29     |
| 3-106-ajor1-kaista1  | 187                              | 77     | 34     | 22     | 14     |
| 3-106-ajor1-kaista2  | 44                               | 26     | 12     | 8      | 6      |
| 9-204-ajor1-kaista 1 | 32                               | 10     | 2      | 2      | 2      |
| 9-204-ajor1-kaista 2 | 6                                | 2      | 2      | 1      | 1      |
| 9-204-ajor2-kaista 1 | 48                               | 22     | 10     | 4      | 4      |
| 9-204-ajor2-kaista 2 | 15                               | 7      | 4      | 2      | 1      |
| 9-205-ajor1-kaista 1 | 51                               | 12     | 5      | 3      | 1      |
| 9-205-ajor1-kaista 2 | 19                               | 8      | 2      | 2      | 2      |
| 9-205-ajor2-kaista 1 | 46                               | 15     | 8      | 5      | 4      |
| 9-205-ajor2-kaista 2 | 6                                | 5      | 5      | 3      | 1      |

### 3 TUNNUSLUKUJEN VERTAILU AJOPANEELIIN

#### 3.1 Lapin koekohteet

##### 10 m ajopaneelin vertailu dataan

Vertailu tunnuslukuihin 10 m ajopaneelihavaintojen osalta toteutettiin siten, että yhtenäisiä 10 m havaintokohtia (ks. luku 2.1) verrattiin kunkin tunnusluvun arvoihin kyseisillä kohdilla (suurpiirteisesti taulukon 10 raja-arvoilla). Lopputuloksena tehtiin ristiintaulukointi vastaavuustapauksille 'ei poikkihalkeamaa' ja 'sietämätön poikkihalkeama'.

Tarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 9. APVM:n osalta vastaavuudet ovat kuriositeetti. Siltä osin kyse on lähinnä siitä, kuinka hyvin ajopaneeli on onnistunut. Tunnuslukujen tuloksia voi tulkita monesta eri näkökulmasta. Faultingin etuna on se, että se ei tulkitse väärin kohtia, joissa ei ole poikkihalkeamaa ja toisaalta vastaavuus sietämättömiin poikkihalkeamiin on hyvä. Tasoeroalgoritmin vastaavuus sietämättömien poikkihalkeamien löytämisessä on parempi. Toisaalta tässä on tarkasteltu vain tiettyjä, yhtenäisiä havaintokohtia. 300 m tarkastelussa havaitaan, että tasoeroalgoritmin määrät ovat suuria, mikä ilmaisee, että se löytää ylimääräisiäkin kohtia sietämättömiksi poikkihalkeamiksi. MPD:n ja IRI 50 mm osalta vastaavuusprosentit ovat hyviä.

Taulukko 9. Kymmenen metrin tarkastelun tunnuslukukohtaiset tulokset.

| APVM                                 | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Tavoite-%     |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|---------------|
| Ei vastaavuutta                      | 5                  | 40                        | 1 %                | 31 %                      | Ei merkitystä |
| Vastaavuus OK                        | 731                | 87                        | 99 %               | 69 %                      | Ei merkitystä |
| Määrä yhteensä                       | 736                | 127                       | 100 %              | 100 %                     |               |
| MPD                                  | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Tavoite-%     |
| Ei vastaavuutta                      | 124                | 14                        | 17 %               | 11 %                      | 0 %           |
| Vastaavuus OK                        | 607                | 114                       | 83 %               | 89 %                      | 100 %         |
| Määrä yhteensä                       | 731                | 128                       | 100 %              | 100 %                     |               |
| Tasoeroalgoritmi profiili 2          | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Tavoite-%     |
| Ei vastaavuutta                      | 65                 | 16                        | 9 %                | 16 %                      | 0 %           |
| Vastaavuus OK                        | 671                | 82                        | 91 %               | 84 %                      | 100 %         |
| Määrä yhteensä                       | 736                | 98                        | 100 %              | 100 %                     |               |
| Tasoeroalgoritmi, kaikki 3 profiilia | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Tavoite-%     |
| Ei vastaavuutta                      | 141                | 8                         | 19 %               | 6 %                       | 0 %           |
| Vastaavuus OK                        | 595                | 119                       | 81 %               | 94 %                      | 100 %         |
| Määrä yhteensä                       | 736                | 127                       | 100 %              | 100 %                     |               |
| Faulting                             | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Tavoite-%     |
| Ei vastaavuutta                      | 25                 | 30                        | 3 %                | 23 %                      | 0 %           |
| Vastaavuus OK                        | 711                | 98                        | 97 %               | 77 %                      | 100 %         |
| Määrä yhteensä                       | 736                | 128                       | 100 %              | 100 %                     |               |
| IRI 50mm                             | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Ei poikkihalkeamaa | Sietämätön poikkihalkeama | Tavoite-%     |
| Ei vastaavuutta                      | 49                 | 16                        | 7 %                | 13 %                      | 0 %           |
| Vastaavuus OK                        | 687                | 112                       | 93 %               | 88 %                      | 100 %         |
| Määrä yhteensä                       | 736                | 128                       | 100 %              | 100 %                     |               |

##### 300 m ajopaneelin vertailu dataan



Tunnuslukujen raja-arvot 300 m tarkastelua varten haettiin 10 m yhtenäistä ajopaneelihavainnoista ja niiden kohdistamisesta kunkin datan tuloksiin. Eri tunnuslukujen raja-arvoina käytettiin keskiarvon mukaan laskettuja taulukon 10 arvoja. Tasoeroalgoritmin osalta ei tutkittu kolmen eri tulostiedoston minimejä. Algoritmin laskennassa määritettiin ohjelman tekovaiheessa minimi-tasoeroksi 20 mm. Periaatteessa tasoeroalgoritmin ohjelmaa voitaisiin muokata siten, että raja-arvo 30 mm olisi tulostiedoston pienin arvo.

*Taulukko 10. Tunnuslukujen raja-arvot 300 m tarkasteluun. Lähtökohtana on käytetty yhtenäisten ajopaneelihavaintojen sitomista tunnuslukuihin.*

| Poikkihalkeaman luokka | Faulting                | Tasoeroalgoritmi kaikki profiilit, minimi | Tasoeroalgoritmi kaikki profiilit, maksimi | Tasoeroalgoritmi profiili 2       | MPD 100 mm | IRI 50 mm |
|------------------------|-------------------------|---|--|-----------------------------------|------------|-----------|
| Sietämätön             | -16.0                   | -   | 30   | 30                                | 26.0       | 47.0      |
| Lievä                  | -10.0                   | -   | 20   | 20                                | 17.0       | 33.0      |
| Huomautus              | Vain 2 lievää havaintoa | Ei tutkita                                | 20 mm on minimi tuloksissa                 | Käytetään samoja kuin edellisessä |            |           |

Taulukossa 10 esitettyjen tunnuslukujen lisäksi tutkittiin IRI 50 mm jatkuvat kohdat. IRI käyttäytyy tyypillisesti siten, että tien epätasaisen jälkeen arvot kohoavat tietyllä välillä. Tällainen jatkuva kohta, jossa arvot ovat koholla, katsottiin tässä yhdeksi raja-arvon ylittäväksi kohdaksi. Vertailussa kaikkiin IRI 50 mm raja-arvon ylittäviin kohtiin huomataan selkeä ero. MPD puolestaan käyttäytyy eri tavalla ja sen osalta ei ollut tarvetta vastaavaan tarkasteluun.

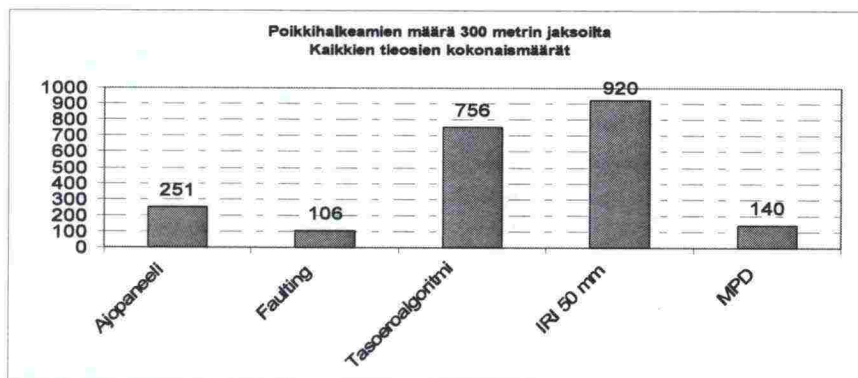
Taulukossa 11 on esitetty 300 m tarkastelun tulokset. Päätuloksena esitetään ajopaneelihavaintojen ja kunkin tunnusluvun erotuksen keskiarvo (itseisarvo). Optimaalinen tulos olisi luonnollisesti nolla, jolloin ajopaneelin ja tunnusluvun määrät vastaisivat täysin toisiaan. Tulosten perusteella Faulting vastaa parhaiten epätasaisen poikkihalkeamien määrää 300 m jaksoilla (erotuksen keskiarvo 1,8 / 300 m). Myös MPD:n vastaavuus on erittäin hyvä (2,0 / 300 m). Tasoeroalgoritmin vastaavuus on tyydyttävällä tasolla (6,0 / 300 m) ja IRI 50 mm vastaavuus melko huono (10,1 / 300 m). Tasoeroalgoritmin profiiliin 2 vastaavuus on huomattavasti parempi kuin tasoeroalgoritmin kaikkien kolmen profiiliin. IRI 50 mm jatkuvien kohtien vastaavuus on myös erittäin hyvä, mutta sen käyttö tunnuslukuna ei ole kovin helppoa.

Kuvassa 15 on havainnollistettu ajopaneelihavaintojen ja raja-arvoilla lasketujen tunnuslukujen määriä histogrammina kaikilta neljältä tieosalta sekä kuvassa 16 ajopaneelin 300 m havaintojen suhdetta tunnusluvuilla havaittuihin poikkihalkeamamääriin. Kuvan 16 diagrammeista on selkeästi nähtävissä, että Faultingin ja MPD:n määrät ovat kaikilla tieosilla samaa tasoa kuin ajopaneelin havaintojen määrät. Sen sijaan Tasoeroalgoritmin ja IRI 50 mm määrät kasvavat ajoittain liian suuriksi. Tasoeroalgoritmilla tämä johtuu mm. useiden profiilien käytöstä ja IRI 50 mm osalta suurien arvojen kertautumisesta epätasaisuuden jälkeen (vrt. ajoneuvon jousituksen käyttäytyminen).

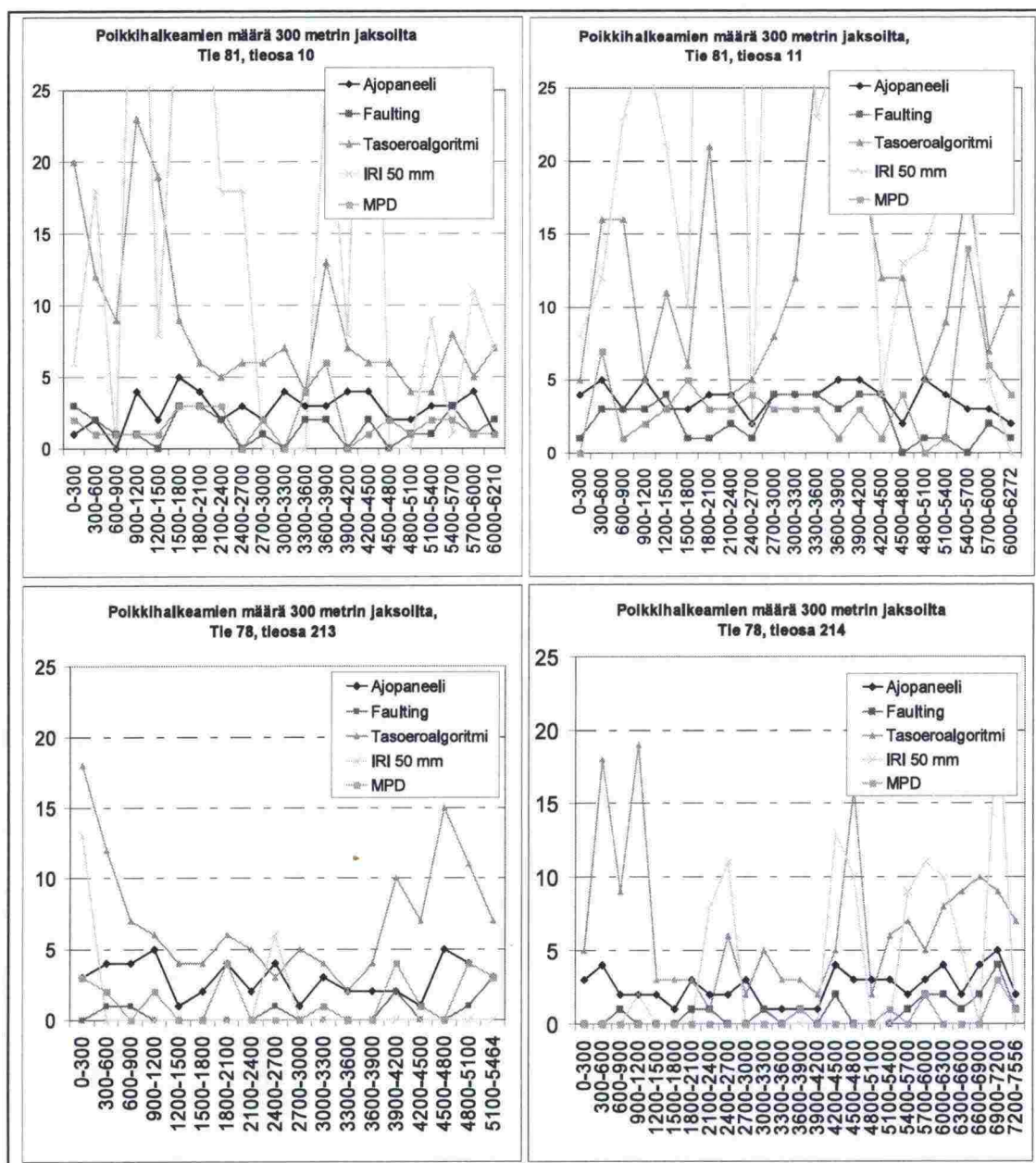


Taulukko 11. 300 m tarkastelun tulokset. Erotuksen Ajopaneelihavainto – Tun-  
nusluku itseisarvo ja sen keskiarvo/300 m kertoo oleellisen viestin tunnusluvun sopivuudesta. Vastaavuus-% on vain viitteelli-  
nen, koska sen ongelmana on havaintomäärien nolla käsittely (vrt. ajopaneeli = 0 ja Faulting = 1 tai ajopaneeli = 1 ja Faulting = 2; ero on sama, mutta vastaavuus-% täysin erilainen).

| Tunnusluku   | Määrät/prosentit tieosittain |        |        |        | Yhteensä | Keskiarvo/<br>300 m | Raja-arvo |
|--|------------------------------|--------|--------|--------|----------|---------------------|-----------|
|  | 81-10                        | 81-11  | 78-213 | 78-214 |          |                     |           |
| Ajopaneeli (havaintojen määrä)                           | 58                           | 78     | 52     | 63     | 251      | 3.0                 |           |
| Faulting   | 30                           | 47     | 9      | 20     | 106      | 1.2                 | -16       |
| Erotus Ajopaneeli-Faulting, itseisarvo                   | 36                           | 33     | 43     | 43     | 155      | 1.8                 |           |
| Faulting vastaavuus-%                                    | 44.9 %                       | 60.5 % | 22.2 % | 31.2 % | 39.9 %   |                     |           |
| Tasoeroalgoritmi (kaikki profiilit)                      | 186                          | 274    | 130    | 166    | 756      | 8.9                 | 30        |
| Erotus Ajopaneeli-Tasoero (kaikki profiilit), itseisarvo | 128                          | 196    | 80     | 109    | 513      | 6.0                 |           |
| Tasoeroalgoritmi (kaikki profiilit) vastaavuus-%         | 41.2 %                       | 41.5 % | 46.6 % | 44.1 % | 43.3 %   |                     |           |
| Tasoeroalgoritmi (profiili 2)                            | 67                           | 140    | 48     | 57     | 312      | 3.7                 | 30        |
| Erotus Ajopaneeli-Tasoero (profiili 2), itseisarvo       | 63                           | 96     | 34     | 56     | 249      | 2.9                 |           |
| Tasoeroalgoritmi (profiili 2) vastaavuus-%               | 36.1 %                       | 49.5 % | 46.9 % | 41.3 % | 43.2 %   |                     |           |
| IRI 50 mm  | 304                          | 497    | 19     | 100    | 920      | 10.8                | 26        |
| Erotus Ajopaneeli - IRI50mm, itseisarvo                  | 276                          | 423    | 57     | 105    | 861      | 10.1                |           |
| IRI50mm vastaavuus-%                                     | 19.1 %                       | 28.2 % | 5.0 %  | 18.3 % | 18.1 %   |                     |           |
| IRI 50 mm jatkuvat kohdat                                | 45                           | 89     | 4      | 17     | 155      | 1.8                 | 26        |
| Erotus Ajopaneeli - IRI50mm jatkuvat kohdat, itseisarvo  | 33                           | 47     | 48     | 46     | 174      | 2.0                 |           |
| IRI50mm jatkuvat kohdat vastaavuus-%                     | 55.5 %                       | 59.3 % | 6.5 %  | 26.5 % | 37.5 %   |                     |           |
| MPD 100 mm   | 37                           | 71     | 24     | 8      | 140      | 1.6                 | 47        |
| Erotus Ajopaneeli - MPD, itseisarvo                      | 35                           | 55     | 32     | 55     | 177      | 2.1                 |           |
| MPD vastaavuus-%   | 49.3 %                       | 49.1 % | 37.4 % | 12.4 % | 35.9 %   |                     |           |



Kuva 15. Neljän tieosan ajopaneelihavaintojen ja tunnuslukujen kokonaismäärät.



Kuva 16. Sietämättömien epätasaisten poikkihalkeamien määrä ajopaneelin ja tunnuslukujen perusteella.

### 3.2 Hämeen betonitiekohteet

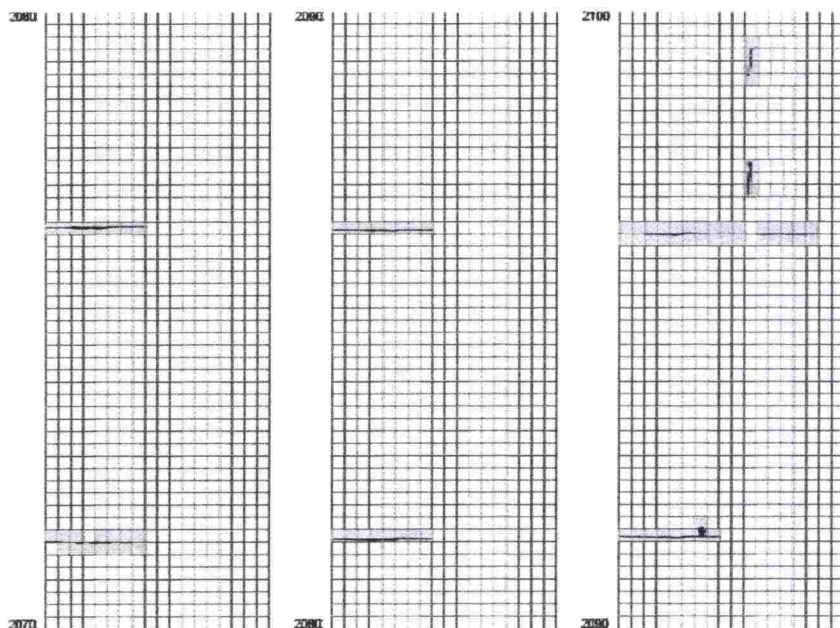
Hämeen betoniteillä ei tehty ajopaneelia, joten tunnuslukujen vertailu ajopaneeliin ei ole mahdollista. Määrien vertailua voi sen sijaan tehdä. Betoniteiden osalta tasoeroja muodostuu betonilaattojen saumakohtiin. Vaikutus ajamiseen voi olla vielä rajumpi kuin esimerkiksi tutkituilla asfaltiteillä Lapis-  
sa, koska betonilaattojen pituus on noin 5 metriä. Taulukossa 10 esitetyillä raja-arvoilla löytyy taulukon 12 mukaiset kappalemäärät raja-arvon ylittäviä kohtia. IRI 50 mm määriä ei esitetä tässä, koska taulukon 6 mukaan raja-arvon 60 mm/m ylittäviä voi esiintyä betoniteillä jopa tuhansia kappaleita. IRI:n 50 mm:n osalta voi todeta, ettei se vaikuta soveltuvan betonilaattojen tasoerojen havainnointiin. Kaikki tunnusluvut vaikuttavat löytävän hyvin tasoeroja niiltä tieosilta, jotka tiedettiin jo etukäteen huonoimmiksi. Tasoeroalgoritmin määrät ovat tosin melko suuria tien 3 tieosalla 106. Jokainen tunnusluku löytää eri tienosan huonoimmaksi tieosaksi. Näiden tulosten perusteella ei voi varmuudella sanoa, mikä olisi paras tunnusluku betoniteiden osalta. Jossain mielessä Faultingin tulokset vastaavat yleistä mielipidettä tieosien ajomukavuudesta ja kunnosta.

*Taulukko 12. Faultingin, Tasoeroalgoritmin ja MPD:n määriä taulukossa 10 määritellyillä raja-arvoilla. Faultingin osalta ylittäväksi kohdaksi on tulkittu, kun vasen tai oikea arvo ylittää rajan. Tasoeroalgoritmin osalta on koostettu kaikkien profiilien tulokset.*

| Tieosat              | Faulting (16 mm) | Tasoeroalgoritmi (30 mm) | MPD (26 mm) |
|----------------------|------------------|--------------------------|-------------|
| 3-106-ajor1-kaista1  | 13               | 63                       | 21          |
| 3-106-ajor1-kaista2  | 35               | 23                       | 24          |
| 9-204-ajor1-kaista 1 | 0                | 10                       | 9           |
| 9-204-ajor1-kaista 2 | 1                | 6                        | 9           |
| 9-204-ajor2-kaista 1 | 0                | 21                       | 3           |
| 9-204-ajor2-kaista 2 | 0                | 10                       | 11          |
| 9-205-ajor1-kaista 1 | 4                | 15                       | 10          |
| 9-205-ajor1-kaista 2 | 0                | 11                       | 30          |
| 9-205-ajor2-kaista 1 | 0                | 23                       | 5           |
| 9-205-ajor2-kaista 2 | 1                | 22                       | 14          |

APVM-vauriokartat ovat hyvää lähtötietoaineistoa betoniteiden vaurioiden havainnoinnissa. Kuvassa 17 on esitetty kolme 10 metrin vauriokarttaa tien 3 tieosalla 106. Vauriokarttojen perusteella havaitaan, että Faulting-tuloksissa useissa kohdissa havaittu toisen profiilin suuri arvo ja toisen pieni arvo on perusteltu. Kuvien mukaan on useassa kohdassa betonilaattojen sauma auki vain toisesta reunasta. Vauriokartat eivät näytä saumaa, joka on hyvin kiinni. Näiden kuvien perusteella vauriokartat voisivat olla itse asiassa paras keino betonilaattojen saumojen tasoeron havainnointiin tai yleensä siihen, onko sauma auki.





Kuva 17. APVM:n vauriokarttoja Hämeen betonitieltä. Betonilaattojen sauma on auki monissa kohdissa vain toisesta reunasta.

### 3.3 Tunnuslukujen vertailu toisiinsa

Ajopaneelihavaintojen ja APVM:n vastaavuutta voi arvioida taulukon 9 ensimmäisten rivien vastaavuusprosenttien mukaan. Yhtenäisillä 10 havaintojaksolla vastaavuus on erittäin hyvä (99 %) niillä tienkohdilla, joissa ei havaittu epätasaisia poikkihalkeamia. Niillä tienkohdilla, joilla ajopaneelissa havaittiin sietämättömän epätasaisia poikkihalkeamia ei vastaavuus ole aivan näin hyvä (69 %), mutta melko hyvä kuitenkin. Molemmilla menetelmillä on epätasaisien poikkihalkeamien suhteen omat puutteensa: APVM-vauriokartoissa eivät näy erittäin ohuet poikkihalkeamat ja ajopaneelin ongelmana on puolestaan havaintojen epäyhtenäisyys.

Taulukossa 13 on tehty tarkastelu tunnuslukujen vastaavuudesta APVM-tuloksiin, lähtökohtana ajopaneelissa havaitut epätasaiset poikkihalkeamakohtat. Taulukosta havaitaan, että ainoat pienemmät prosenttiluvut ovat kohdissa APVM - Tasoeroalgoritmi, ei vastaavuutta ja APVM - Faulting, ei vastaavuutta. Niillä tienkohdilla, joilla APVM – Ajopaneeli vastaavuus on OK, on myös APVM:n vastaavuus tunnuslukuihin hyvä. Taulukon 14 mukaan Faultingin ja APVM:n vastaavuus Faultingin suurilla arvoilla on erittäin hyvä.

Taulukko 13. APVM:n vertailu tunnuslukuihin ajopaneelihavaintojen lähtökohdasta sekä taulukon alareunassa Faultingin vertailu taseroalgoritmiin.

| APVM            | MPD                                  | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Tavoite-% |
|-----------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------|
| Ei vastaavuutta | Ei vastaavuutta                      | 3                       | 10                           | 60 %                    | 25 %                         | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 2                       | 30                           | 40 %                    | 75 %                         | 100 %     |
| Vastaavuus OK   | Ei vastaavuutta                      | 121                     | 4                            | 17 %                    | 5 %                          | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 605                     | 83                           | 83 %                    | 95 %                         | 100 %     |
| Määrät yhteensä |                                      | 731                     | 127                          | 100 %                   | 100 %                        |           |
| APVM            | Taseroalgoritmi<br>profiili 2        | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Tavoite-% |
| Ei vastaavuutta | Ei vastaavuutta                      | 2                       | 6                            | 40 %                    | 15 %                         | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 3                       | 34                           | 60 %                    | 85 %                         | 100 %     |
| Vastaavuus OK   | Ei vastaavuutta                      | 63                      | 10                           | 9 %                     | 11 %                         | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 668                     | 77                           | 91 %                    | 89 %                         | 100 %     |
| Määrät yhteensä |                                      | 736                     | 127                          | 100 %                   | 100 %                        |           |
| APVM            | Taseroalgoritmi,<br>kaikki profiilit | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Tavoite-% |
| Ei vastaavuutta | Ei vastaavuutta                      | 3                       | 0                            | 60 %                    | 0 %                          | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 2                       | 19                           | 40 %                    | 100 %                        | 100 %     |
| Vastaavuus OK   | Ei vastaavuutta                      | 138                     | 39                           | 19 %                    | 7 %                          | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 593                     | 553                          | 81 %                    | 93 %                         | 100 %     |
| Määrät yhteensä |                                      | 736                     | 611                          | 100 %                   | 100 %                        |           |
| APVM            | Faulting                             | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Tavoite-% |
| Ei vastaavuutta | Ei vastaavuutta                      | 4                       | 37                           | 80 %                    | 93 %                         | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 1                       | 3                            | 20 %                    | 8 %                          | 100 %     |
| Vastaavuus OK   | Ei vastaavuutta                      | 23                      | 19                           | 3 %                     | 22 %                         | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 708                     | 68                           | 97 %                    | 78 %                         | 100 %     |
| Määrät yhteensä |                                      | 736                     | 127                          | 100 %                   | 100 %                        |           |
| APVM            | IRI 50mm                             | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Tavoite-% |
| Ei vastaavuutta | ei vastaavuutta                      | 1                       | 6                            | 20 %                    | 15 %                         | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 4                       | 34                           | 80 %                    | 85 %                         | 100 %     |
| Vastaavuus OK   | ei vastaavuutta                      | 48                      | 10                           | 7 %                     | 11 %                         | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 683                     | 77                           | 93 %                    | 89 %                         | 100 %     |
| Määrät yhteensä |                                      | 736                     | 127                          | 100 %                   | 100 %                        |           |
| Faulting        | Taseroalgoritmi,<br>kaikki profiilit | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Ei poikki-<br>halkeamaa | Sietämätön<br>poikkihalkeama | Tavoite-% |
| Ei vastaavuutta | Ei vastaavuutta                      | 9                       | 1                            | 36 %                    | 3 %                          | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 16                      | 29                           | 64 %                    | 97 %                         | 100 %     |
| Vastaavuus OK   | Ei vastaavuutta                      | 132                     | 8                            | 19 %                    | 8 %                          | 0 %       |
|                 | Vastaavuus OK                        | 579                     | 90                           | 81 %                    | 92 %                         | 100 %     |
| Määrät yhteensä |                                      | 736                     | 128                          | 100 %                   | 100 %                        |           |

Taulukko 14. Faultingin ja APVM:n vastaavuus havaintomäärinä ajopaneelin tieosilla. Vastaavuus Faulting-määriin raja-arvoilla >20 mm ja >25 mm on hyvä (keltaiset solut).

|                             | Määrät tieosittain |       |        |        |
|-----------------------------|--------------------|-------|--------|--------|
|                             | 81/10              | 81/11 | 78/213 | 78/214 |
| Poikkihalkeamien määrä      | 58                 | 102   | 26     | 5      |
| Faulting vastaa APVM:ää     | 48                 | 91    | 22     | 5      |
| Faulting ei vastaa APVM:ää  | 10                 | 11    | 4      | 0      |
| Faulting vastaa APVM:ää >10 | 26                 | 72    | 3      | 0      |
| Faulting vastaa APVM:ää >15 | 14                 | 41    | 1      | 0      |
| Faulting vastaa APVM:ää >20 | 8                  | 21    | 0      | 0      |
| Faulting vastaa APVM:ää >25 | 4                  | 11    | 0      | 0      |
| Faulting kaikki >10 mm      | 62                 | 91    | 34     | 61     |
| Faulting kaikki >15 mm      | 31                 | 51    | 12     | 23     |
| Faulting kaikki >20 mm      | 16                 | 25    | 2      | 4      |
| Faulting kaikki >25 mm      | 7                  | 12    | 1      | 0      |



## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET TUNNUSLUKUJEN SOVELTUVUUDESTA

Johtopäätöksiä tunnuslukujen soveltuvuudesta voidaan tehdä seuraavista näkökulmista:

- Lähtötietona käytettävän mittausdatan käytettävyys
- Laskentatulosten käytettävyys
- Tunnusluvun vastaavuus ajopaneelihavaintoihin 10 m tasolla
- Tunnusluvun vastaavuus ajopaneelihavaintoihin 300 m tasolla

Lähtötiedoksi mitattavan datan käytettävyyden osalta voidaan johtopäätöksiä esittää:

- Faulting: mittausdata Faultingia varten saadaan alemman tason datana, jolloin mittausdata on käytettävissä miltä tahansa mitatulta tieltä (vaatii tiedon tallennustarpeesta ennen mittausta).
- Tasoeroalgoritmi: mittausdataa varten joudutaan tekemään erikoismittaus tarkkaa pituusprofiilia varten. Mittauksen hinta on hieman kalliimpi kuin normaalin tuotantomittauksen.
- MPD: mittausdata saadaan alemman tason datana, jolloin mittausdata on käytettävissä miltä tahansa mitatulta tieltä (vaatii tiedon tallennustarpeesta ennen mittausta).
- IRI 50 mm: mittausdataa varten joudutaan tekemään erikoismittaus tarkkaa pituusprofiilia varten. Mittauksen hinta on hieman kalliimpi kuin normaalin tuotantomittauksen.

Laskentatulosten käytettävyyden osalta voidaan esittää seuraavat johtopäätökset:

- Faulting: laskentaa varten on olemassa valmis ohjelma. Tulostiedostoihin kirjautuvat vain korkeuseroja sisältävät kohdat. Laskentatulosten käytettävyys on hyvä.
- Tasoeroalgoritmi: laskentaa varten kehitetty ohjelma toimii. Laskenta poimii liikaa tasoeroja, mikä vaikeuttaa tulosten käytettävyyttä. Lisäksi eri pituusprofileille tulee omat tulostiedostonsa, mikä myös vaikeuttaa tulosten käyttöä (tiedostot vaativat manuaalista jatkokäsittelyä). Ratkaisuna ongelmiin on ohjelman jatkokehitys, esimerkiksi laskentaetäisyyden (0,5 m) pidentäminen sekä tulostiedostojen yhdistäminen. Ohjelmaa on mahdollista kehittää tarpeiden mukaan. Laskentatulosten käytettävyys on tyydyttävällä tasolla.
- MPD: tunnusluku osoittaa vain epätasaisen kohdan, eikä ylimääräisiä suuria arvoja esiinny. Tulosten käytettävyyden osalta miinuksena ovat suuret tiedostokoot sekä tulosten manuaalinen käsittely poikkeamakohtien löytämiseksi. Tähän lienee mahdollista rakentaa Excel-makroja. Laskentatulosten käytettävyys on melko hyvä.
- IRI 50 mm: laskentatuloksiin tulee liikaa peräkkäisiä suuria arvoja epätasaisuuksien jälkeen. Tämä vaikeuttaa laskentatulosten käytettävyyttä. Lisäksi tulostiedostojen koko on melko suuri ja tulostiedostojen joudutaan käsittelemään manuaalisesti poikkeamakohtien löytämiseksi. Laskentatulosten käytettävyys on tyydyttävällä tasolla.

Tunnuslukujen vastaavuudesta 10 m ajopaneelituloksiin voidaan esittää seuraavat johtopäätökset:

- Faulting: vastaavuus ajopaneelissa havaittuihin tienkohtiin, joissa ei ole epätasaista poikkihalkeamaa, on erittäin hyvä. Vastaavuus sietämättömien poikkihalkeamien osalta on hyvä.
- Tasoeroalgoritmi: vastaavuus ajopaneelissa havaittuihin tienkohtiin, joissa ei ole epätasaista poikkihalkeamaa, on hyvä. Vastaavuus sietämättömien poikkihalkeamien osalta on erittäin hyvä.
- MPD: vastaavuus ajopaneelissa havaittuihin tienkohtiin, joissa ei ole epätasaista poikkihalkeamaa sekä sietämättömien poikkihalkeamakohtien osalta, on hyvä.
- IRI 50 mm: vastaavuus ajopaneelissa havaittuihin tienkohtiin, joissa ei ole epätasaista poikkihalkeamaa, on erittäin hyvä. Vastaavuus sietämättömien poikkihalkeamien osalta on hyvä.

Tunnuslukujen vastaavuudesta 300 m ajopaneelituloksiin voidaan esittää seuraavat johtopäätökset:

- Faulting: vastaavuus 300 m ajopaneelissa havaittujen sietämättömien poikkihalkeamien määrään on erittäin hyvä.
- Tasoeroalgoritmi: vastaavuus ajopaneelissa havaittujen sietämättömien poikkihalkeamien määrään on korkeintaan tyydyttävä. Muutamille 300-metrisille kerääntyy erittäin suuri määrä havaintoja. Yhden profiilin käyttö kolmen sijasta laskee havaintomäärää selkeästi, jolloin tulos on parempi.
- MPD: vastaavuus ajopaneelissa havaittujen sietämättömien poikkihalkeamien määrään on erittäin hyvä.
- IRI 50 mm: vastaavuus ajopaneelissa havaittujen sietämättömien poikkihalkeamien määrään on huono. Tämä perustuu IRI:n laskentatapaan, jossa epätasaisen kohdan jälkeenkin esiintyy suuria arvoja. Lisäksi IRI reagoi mihin tahansa epätasaisuuteen. Jos erotetaan IRI:n jatkuvat, suuria arvoja sisältävät kohdat omaksi kokonaisuudekseen, on vastaavuus erittäin hyvä.

Kokonaisuutena voidaan arvioida:

- Faulting on kokonaisuutena paras tutkituista tunnusluvuista, perustuen oikeiden kohtien löytämiseen ja erityisesti käytettävyyteen (voidaan laskea normaalista alemman tason datasta).
- MPD on Faultingin jälkeen käytettävien tunnusluvuista. Voidaan Faultingin tapaan laskea alemman tason datasta. Manuaalisen käsittelyn helpottamiseksi lienee mahdollista rakentaa Excelin makroja.
- Tasoeroalgoritmi tuo liikaa sietämättömiä poikkihalkeamahavaintoja, erityisesti jos käytetään 3 profiililinjaa. Yhden ainoan profiililinjan käyttö on selkeämpää. Laskentaohjelma vaatisi vielä hiomista.
- IRI 50 mm: laskentatulosten liialliset peräkkäisten suurten arvojen jaksot eivät tee tunnusluvusta käytettävää epätasaisen poikkihalkeamien suhteen.
- Jatkokäyttöä varten suositellaan Faultingin ja MPD:n käyttöä.



## 5 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää menetelmä, jolla epätasaiset poikkihalkeamat voidaan paikallistaa tieverkolta, muuntamalla PTM-mittauksista saatavan profiilidatan keräämistä ja mahdollisuuksien mukaan verrata profiilidataa automaattisen päällysteiden vauriomittauksen (APVM) vauriokarttoihin.

Keväällä 2006 toteutettiin Lapissa neljälle tieosalle ajopaneeli, jonka 10 m ja 300 m havainnot ja kokemuksia verrattiin PTM-mittauksen avulla tuotettuihin tunnuslukuihin. Samojen tieosien PTM-mittaus tehtiin huhti-toukokuussa 2006 ja APVM-mittaus kesäkuun lopulla 2006 (mittaustekniikka luvuissa 1.5 ja 1.6).

Ajopaneelin tulokset käsiteltiin siten, että 10 m havainnoista valittiin yhtenäiset 10 m jaksot, joilla kolme neljästä havainnoitsijasta oli samaa mieltä (luku 2.1). 300 m havainnoista laskettiin neljän havainnoitsijan keskiarvo kutakin 300 m jaksoa kohti. APVM:n vauriokartoista saatiin selkeät poikkihalkeamakohtat kultakin tieosalta (luku 2.4).

Tutkittuja tunnuslukuja olivat Faulting-algoritmilla ja Tasoeroalgoritmilla (luku 2.5) tuotetut tunnusluvut sekä MPD ja IRI 50 mm (luku 2.3). Näistä tunnusluvuista Faulting ja MPD saadaan PTM:n alemman tason datan avulla ja Tasoeroalgoritmin data ja IRI 50 mm erikoismittauksena tuotetun pituusprofiilin avulla.

Tunnuslukujen soveltuvuutta arvioitiin tilastollisten seikkojen (10 m ja 300 m vastaavuudet, luvut 3.1 ja 4) sekä lähtötietona käytettävän mittausdatan käytettävyyden ja laskentatulosten käytettävyyden perusteella (luku 4). Lähtötiedoksi mitattavan datan pohjalta ovat Faulting ja MPD parhaita, koska tunnusluvuissa käytettävä data saadaan miltä tahansa mitatulta tieltä (vaatii tiedon tallennustarpeesta ennen mittausta). Laskentatulosten käytettävyys on hyvä Faulting-tunnusluvulla. Ajopaneeliin 10 m havaintoihin verrattuna on vastaavuusprosentti paras Tasoeroalgoritmilla, mutta kaikilla muilla tunnusluvuilla myös hyvä. Tasoeroalgoritmin huonona puolena ovat toisaalta liialliset havaintomäärät. Vertailussa ajopaneelin 300 m havaintoihin ovat Faulting ja MPD parhaita. Tunnuslukujen vertailussa toisiinsa havaittiin vastaavuuden olevan kaikkien tunnuslukujen osalta hyvä, silloin kun tunnuslukujen vastaavuus ajopaneeliin on hyvä (luku 3.3). Lisäksi havaittiin Faultingin suurten arvojen ja APVM-tulosten hyvä vastaavuus.

Kokonaisuuden huomioiden suositellaan asfalttipäällysteisten teiden epätasaisen poikkihalkeamien havainnointiin Faulting-tunnuslukua ja vaihtoehtona MPD:tä (luku 4).

Betoniteiden osalta Faulting vaikuttaa soveltuvalta, minkä lisäksi APVM:n vauriokartat antavat erittäin hyvän havaintomateriaalin betonilaattojen saumakohtien avonaisuuteen (luvut 3.2 ja 4).



## 6 LÄHTEET

JP-Transplan Oy (2006). Toistuvien poikkihalkeamaepätasaisuuksien vaikutus ajomukavuuteen. Tiehallinto, Helsinki.

Ramboll (Mattila, Kalervo & Persson, Eva-Maria, 2006). Kuvaus tien pinnan LaserRST-kuntoparametreista Suomessa, versio 10. Julkaisematon ohjekumentti.

Tiehallinto (2001). Poikkihalkeamatutkimus.

## 7 LIITTEET

FAULTING-KÄYTTÖOHJE, VERSIO 1      Liite 1

## FAULTING-KÄYTTÖOHJE, VERSIO 1



## FAULTING general principles

Version 1

Date: 2006-10-12

Christer Ohlman / OPQ Systems

## 0 DOCUMENT META DATA

### Document Distribution List

| Name | Distributed<br>(Yes / No) | Date<br>(mm/dd/yy) |
|------|---------------------------|--------------------|
|      |                           |                    |
|      |                           |                    |
|      |                           |                    |
|      |                           |                    |

### Document: History

| Version | Date       | Changes  | Author          | Documents<br>affected |
|---------|------------|--|-----------------|-----------------------|
| 1       | 2006-05-24 | first version  | Christer Ohlman | OPQSRS15              |
| 2       | 2006-05-30 | updated to reflect what is<br>done in order to make a<br>simpler calculation | Christer Ohlman | OPQSRS15              |
| 3       | 2006-05-31 | simplified description<br>document   | Christer Ohlman | OPQINF15              |
| 4       | 2006-10-11 | Redacted faulting<br>principles for more<br>general publication              | Christer Ohlman | OPQINF16              |
| 5       | 2006-10-12 | More general<br>information, references<br>to existing standards             | Christer Ohlman | OPQINF16              |

**References:**

Adaptability of AASHTO Provisional Standards for Condition Surveys for Roughness and Faulting in Kansas / Kamesh Vedula, Rick Miller, Mustaque Hossain, Gaylord Cumberledge - Proceedings of the 2003 Mid Continent Transportation Research Symposium.

## **INTRODUCTION TO FAULTING**

### **FAULTING**

This document defines a method that will give robust statistics for determining the extent a road surface suffers from faulting defects. This is a statistic and not an absolute measure, in that it is applied to profiles collected from a survey vehicle and will have measured not just faulting, but other defects on the surface too.

The defects that we wish to count is often confused with more common disturbances like raveling, spalling, stone loss, cracking or general debris on a road surface.

However, detection and measurement in an automated way is difficult. There exists standards for measuring faults quite well once they have been located, usually through manual inspection where we know where they are located.

### **About the method for locating faulting events**

Not every edge or hole we can detect will count as a fault and have the severe effects esp. on heavy vehicles as a real faulting edge has. Simply detecting edges in a profile description of the road surface is not the answer. Instead there must be defined some configurable method that sorts away features that are not relevant. Doing this is easy in principle, but quite hard when one considers:

1. Automatic detection. The method should be independent of driving speed. This requirement means that the most commonly used time domain filters are difficult to use.
2. The method should be independent of transducer technology used (to reasonable extents). If you have a broken sensor and replace it in the mid of measurement, it should not affect the result. Things do happen in the real world, vehicles can be damaged. A replacement transducer should have no effect on the result.
3. The method should be configurable to remove from consideration faults that will not effect given they are caused by other mechanisms. This includes spalling, cracking, debris, stone loss, raveling etc.
4. The method should document all features that were found but classified as not being faulting events. The reason for this is to allow the rule set used for automatic detection to be improved. If a faulting edge you know exists isn't counted as such, these extra measured values can be examined such that the question: why it was not counted? can be answered. This allows the method to evolve and get better, providing reviews on surfaces with known statistics is made.
5. The method should consider the surface can be driven over in either direction but that measurement usually is only in a single direction at the time of measurement. Faultings can be both negative and positive and should be classified as such.



6. The method should be repeatable, several runs on the same object should yield statistically significant the same result.
7. The method should address that a vehicle may pass over a fault in angles other than 90 degrees.
8. The method should remove from consideration intentional surface roughening attempts made on some types of concrete surfaces, used to improve water evacuations. Such evacuation channels or grooves should not be detected as faultings.
9. The method should be able to use multiple sensors to prevent spalling, stone loss and other local effects to be counted as faulting events. Manual methods require for example spalling to not be reported as faulting, the discriminant in that case is a visual inspection by the operator. An automated method must rely on several surface characteristics and multiple transducers to accomplish this.

## Configuring to capture faulting

### What the product does

Measures and categorizes the extent of faulting detected given the configured set of transducers. The method uses more than one laser transducer for faulting location, at least 2 but preferably more laser transducers are used for the calculation.

| Transducer technology | Description   |
|-----------------------|---|
| Pulse transducer      | Key to accurately count the vehicle movement over the surface, the transducer counts small increments as a wheel rolls over the surface. This provides a clock that is based in distance, not time. |
| Laser optocator 1     | This describes the surface height as seen from the vehicle in one point.  |
| Laser optocator 2     | This describes the surface height as seen from the vehicle in a second point.   |

The pulse counted distance is used to describe a surface profile. More common in usage is to simply record a time domain profile signal, but a distance domain signal has the advantage that variations in the vehicle speed will not affect the result.

If you have a time domain collected surface profile, it can be converted into distance domain providing that you can accurately measure the vehicle speed changes and remove them.

This method assumes a distance domain surface profile has been captured in at least two points. This method works providing that the surface profile is known in at least two points. The two profiles should be collected in synchrony with each other.

$P1(x)$

$P2(x)$

Where  $P1(x)$  and  $P2(x)$  are surface profiles collected over distance. Typically at least 0.001 meter resolution on the distance axis is desired, but better is of course not bad.

The first filter we apply is a low pass filter designed to remove any surface features shorter than 50 millimeters. This prevents loose gravels from having a severe effect, since every edge of a stone could possibly be confused with a faulting edge.

The profiles are collected in such a way that at every delta-X each of the profiles signals are synchronized. This is to say that the two transducers must be synchronized with each other in the distance domain. How this is realized in a real system will vary, however the requirement is that both profiles are reasonably stepping by the same amount and in synchrony.

### **Constraints that two or more transducers removes**

Since faults can run not just perpendicular to the direction the vehicle travels, but just about any direction, esp. when corner-cracking is found, it means we must intelligently correlate more than one laser transducer in order to discover real faulting events.

The program uses the several laser transducers along with a windowing filter in order to remove any pot-holes, small cracks or other dents in the surface that does not extend far enough or is not severe enough to categorize as a faulting event.

The main idea behind the product is to use smart correlation between several transducers in order to discover this elusive variable.

Let's make one thing particularly clear:

#### **Measuring faulting is difficult**

Using more than two laser transducers would be even better, but increases the cost of the measurement system considerably. If the measurement system provides more than two profiles, by all means it can be used to further reduce the number of false positives.

### **What is faulting**

A faulting is a height difference between two adjoining pavement concrete (or other rigid material) plates. The builder make these road segments with a hopefully zero (0) height difference, but over time the individual slabs will sometimes move about. When this happens one edge may creep higher than the other and in such a situation vehicles traveling over it will experience severe bumps. This especially troublesome to heavy vehicles and can be a hazard.

This is especially bad for heavy vehicles since the plate edges will usually compress even further making the fault feel even worse than a quick visual inspection reveals.

Sometimes the edges of a slab can break off causing something that is called corner-cracks. This is just the same misfeature as a fault, except that it usually goes in a diagonal direction (or just about any direction). The gap where a piece was pushed down can be a discomfort to traffic passing by, it also is a problem when water fills in below that can erode and make the faulting even worse.

### **Faulting is measured as a relative height**

Faulting is measured as a relative height (in millimeters, or inches) that the slabs are misaligned by. Usually there is a minimum relative difference before the faulting is counted. This to eliminate readings from any loose grains located on the surface.

Further as is suggested statistics is collected to map out exactly where we find the faulting edges. Their severity etc.

### Existing standards (manual) for measuring faulting

The AAHSTO organization defines a procedure for categorizing faults and measuring them. This standard however describes a method suitable for manual inspections, where an operator has located a fault edge and straddles a measurement device over it. Subsequently the readings are categorized and care taken that false readings (spalling, loose stones etc) are not noted in the protocol. The procedure for such discrimination is at the operators discretion.

AAHSTO protocol PP-39 00 specifies that aggregations of the observations be given over 0.1km statistics links. For automated surveys the protocol specifies the settings for the relative height measures. But not the actual procedure for automatically locating where the faults are to be found.

Once a fault site is known, the protocol defines that it is measured according to these settings:

| AAHSTO term    | Range       | Our term            |
|----------------|-------------|---------------------|
| Approach slab  | 75 - 225 mm | Reference distance  |
| Separation     | 300 mm      | Faulting distance   |
| Departure slab | 75 - 225 mm | Comparison distance |

The statistics should be collected only when the measured faulting height exceeds 5.0 millimeters.

Thus prepared with these settings, it should be possible to reproduce the AAHSTO faulting with this method as well as other settings.

### Anatomy of a faulting event

Consider the next figure, for clarity only 2 laser points are considered. The two laser points trace out a surface profile trace that describe how the surface height looks like from the viewpoint of each laser.

The two dotted red lines is just an indication of what each of the two lasers see. When passing over the fault, both will experience a height difference, either *positive* or *negative*.

We notice that if this was a pot hole or similar misfeature, then both (or even several) lasers will not agree as to the general occurrence of this event.

To make this possible as a variable that will be computed in a robust fashion we define the following two rule sets for NEGATIVE and POSITIVE faulting:



| Setting NEGATIVE faulting | Description  |
|---------------------------|--|
| Reference distance        | <p>This is the distance leading up to the fault. It means we have to see no bumps or large tilts for at least this distance before the actual faulting event. This setting prevents surfaces with heavy raveling to trigger the algorithm. If we see many small holes all the time even when correlated, we shouldn't react.</p> <p>The rule that is used is as follows:</p> <p>The average height value for the reference distance must be higher than the sum of the (user configurable) minimum faulting depth and the comparison distances average height value.</p> |
| Faulting distance         | The comparison distance window must be below the sum of the reference windows average height and the (user configurable) minimum faulting depth. The faulting depth obviously is not very close to zero or every grain would cause a trigger.  |
| Comparison distance       | Once past the faulting event we must have at least this distance until another disturbance occurs. The last height value in the faulting distance window must be greater than the sum of the (user configurable) minimum faulting depth and the first height value in the faulting distance window (closest to the comparison distance window).  |

Then very similarly for a POSTIVE faulting we have another set of rules.

| Setting POSITIVE faulting | Description  |
|---------------------------|--|
| Reference distance        | The average height for the reference distance must be lower than the sum of the (user configurable) minimum faulting depth and the comparison distances average height value.  |
| Faulting distance         | All height values in the reference distance window added with the (user configurable) minimum faulting depth must be lower than the comparison windows average height.   |
| Comparison distance       | The last height value in the faulting distance window (closest to the reference distance window) added to the sum of the (user configurable) minimum faulting depth must be lower than the first height value in the faulting distance window (closest to the comparison distance window). |

### Correlation of faulting events over several transducers

The above obviously looks only on a single data point. The advantage of the FAULTING method is seen when we compare correlated computations between several independent transducers.

The solution is that the procedure uses *templates* trying to match what it sees to a number of models of how a fault is supposed to look like. Once any of the templates matches, they are counted and measured and added up to the statistics.

Now generally the following table is an overview of what the correlation between the several traces of faulting events do and based on how events unfold the algorithm will select certain reactions based on the road profiles in question.

Note: that this doesn't exactly describe the algorithm, but outlines how it goes about doing things.

| Potential faulting   | Description of action   |
|--|---|
| All laser transducers in the calculation set are treated to signal POSTIVE and NEGATIVE faulting events along with their height, location etc. | Each individual laser trace is processed according to the method for discovery of FAULTING events. All such places are noted in a table per transducer.   |
| There must be two potential faultings on at least two channels that sit adjacent to each other.  | If one channel has a faulting event and within the reference distance we don't find a corresponding such event in the other channel, then both faulting events are canceled.  |
| The sign of the faultings must be equal.   | Both channels must be either POSTIVIE or NEGATIVE. If one differs the event is canceled.  |
| The distance between detected faultings must be zero. Basically this measure is how long it was since the last triggering.                     | This is a distance between detected faultings, we must be starting fresh and not just recently seen an event. This means that for at least the distance between detected faultings the detection of potential faultings must have been silent. This reduces very much interference from potholes.   |
| Common faulting distance is not exceeded.  | It is allowed that the first potential faulting event and the event in the second channel are "staggered" from each other by this amount.<br><br>This means that some diagonal faults are also allowed up to a certain limit.   |
| During correlation when a flagged potential even is being processed, the inhibit seek for faulting distance must not be exceeded.              | What this means is that during the correlation of two potential faulting events, any co-located also potential events in other words sitting on top of the fault we are investigating will be disregarded.<br><br>This means that shattered pieces with more than one gap, will still look just like one faulting event.<br><br>Once the inhibit distance has gone by, will new potential faulting events be processed. |

As you can see from this brief description the FAULTING application consists of two parts.

1. A potential faulting finder
2. A correlation and rule-based system that figures out based on several events found which ones really are to be considered faulting events.

There are a number of settings that define the various lengths mentioned in this table. The complete specification of exactly what each distance means is found in Section 3 in this SRS document.

To sum things up, the rule set makes it possible to in an automated fashion discover locations that are very likely to be the sites of faulting events.

Further refinements and specific algorithms allow the software to determine with greater and greater confidence that the flagged problem areas are locations with faults.

## User settings and documenting them

The user of the method obviously picks a few settings for the method and applies them. If you wish to use the AAHSTO protocol, you obviously make a choice of parameters for matching that.

But you are not limited to that. By changing the parameters the statistic can be configured to detect features other than faulting events.

User settings affect the result VERY much, such that any usage of the method is incomplete without also documenting exactly which parameters was used in the calculation.

## What the product does not do

Help you with selection of the configuration values. The selection of reference distance, faulting distance, comparison distance, inhibit distance can greatly affect how well this application performs. This product does not address how to best figure out which settings to use.

This usually means that the amplitude of a signal after a filter is not exactly the same as before. The consequence is that if you use different filter settings you can experience different height measures. This is perfectly correct.

This product cannot help you get the same result when running with a different setting.



### Used parameter settings for the faulting parameter

The test run faulting location finder has been using the following filter parameters

| Setting                            | Description   |
|------------------------------------|---|
| faulting distance                  | Maximum fault transition 0.3 meter (gap maximum width including eroded sides) |
| reference distance                 | 0.8 meter   |
| comparison distance                | 0.8 meter   |
| inhibit seek for faulting distance | 0.8 meter   |

The profile was prepared with the following parameters

| Setting for filters | Description   |
|---------------------|---|
| baseband filter     | 10.0 meter time-reversed High-pass filter, this filter simply removes gradients and general tilt from the profile         |
| minimum threshold   | 1.0 millimeter, this threshold should be selected based on the general texture rms content of the measured road sections. |

faulting distance 0.8 meter, is used to determine a general level of the surface, used for subsequent comparisons, for every sample of the road a reference level is computed from the surrounding samples.

faulting distance defines the longest transition over which the faulting edge is detected, maximum edge 0.3 meter max (0.1m typical) you do not want much shorter say 10mm in which case stone loss and raveling might be mistaken for faulting.

post-faulting hold off 0.8 meter, avoids the same edge to trigger many times if there are loose stones.

inhibit seek distance is 0.8 meter, which means that when a fault is being detected, the algorithm is restarted only this distance later. This will to some extent prevent multiple gravels etc to trigger frequent reports.

Baseband removal, 10.0 meter, this removes any profile drift/tilt and is a high-pass filter type operation.

Currently this filter only does the correlation filtering. No statistics yet, but all detected fault locations are output along with the faulting height.



ISSN 1459-1553  
ISBN 978-951-803-783-8  
TIEH 3201020-v